

# 次世代デジタル変電所開発に資する電力用油入変圧器内の部分放電メカニズムの解明

|          |   |
|----------|---|
| 著者       | 吉田 成是   |
| その他のタイトル | Study on Mechanism of Partial Discharge in Oil-immersed Power Transformer for Development of Next Generation Digital Substation |
| 学位授与年度   | 令和3年度   |
| 学位授与番号   | 17104甲工第531号  |
| URL      | <a href="http://hdl.handle.net/10228/00008642">http://hdl.handle.net/10228/00008642</a>   |

令和 3 年度 博士学位論文

次世代デジタル変電所開発に資する

電力用油入変圧器内の

部分放電メカニズムの解明

Study on Mechanism of Partial Discharge

in Oil-immersed Power Transformer

for Development of Next Generation Digital Substation

九州工業大学大学院工学府  
電気電子工学領域

吉田 成是



## 要旨

近年、電力用変圧器は、デジタル化や省人化の要望が高まっていることから、外部からの異常診断や劣化兆候の検出によって機器の健全性をリアルタイムで監視可能とした「デジタル変圧器、デジタル開閉器」および、それらを使用した「デジタル変電所」の提案がされている。

一方、高度経済成長期に大量導入された電力用油入変圧器の更新が控えていることから、経済性の観点から小形化・高効率化の要望も高まっている。さらに、持続可能社会の実現に向け、鉱油は廃油時にCO<sub>2</sub>を大量に排出することから、廃油時のCO<sub>2</sub>排出量が少なく、生分解性も高い油として、エステル油の適用も進んでいる。更なる小形化のためには、その内部の絶縁特性の改革が重要であり、その一環として絶縁破壊の前駆現象として知られている部分放電メカニズムの解明が必要である。また、鉱油の代替となる環境調和型エステル油入変圧器の高信頼化のためには、エステル油中の部分放電特性の解明が重要である。

以上より、本研究では、絶縁油と固体絶縁材料の界面における沿面放電進展特性の解明検討、およびその数値解析シミュレーションを世界で初めて構築した。また、エステル油中の部分放電特性の解明、および変圧器のデジタル化を実現する上での課題と解決方法について論じた。以下に本論文の構成と概要を記す。

第1章は『序論』である。前術の検討内容を取り組むことになった研究背景や動向、研究着手時の各種課題等について述べる。

第2章では、『鉱油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明』について述べる。本研究の着手当時には、油/プレスボード複合系において雷インパルス電圧を繰り返し印加すると、放電発生後に放電経路に沿って白色生成物が残り、絶縁上弱点になる可能性があるという課題あった。従って、放電進展後に形成される白色生成物が絶縁上弱点になりえるか把握することを目的に、ストリークカメラ、光電子増倍管、および電流パルス検出を用いた独自の放電観測システムを構築し、雷インパルス電圧印加下における部分放電開始電圧を測定した。その結果、白色生成物形成によって部分放電開始電圧が低下することを明らかにし、沿面放電発生後に形成される白色生成物が絶縁上弱点になりえることから、実器の出荷時の課電試験において白色生成物の形成に注意が必要であることが判明した。

第3章では、『放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明』について述べる。本研究の着手当時には、複数のバリアプレスボードを用いた油/プレスボード複合絶縁系における沿面放電メカニズムの解明が課題としてあった。そこで、沿面放電メカニズムの解明を目的に、有限要素法を用いた数値解析シミュレーションを行った。その結果、インパルス沿面放電の計算モデルには一般的なポアソン式、電荷連続式、熱拡散方程式に加えて、複合絶縁系特有の電子放出および空間電荷形成などの各種パラメータをナノ秒オーダーの時間・空間分布として計算に考慮することで、実験より得られた104 m/sオーダーの放電進展速度をシミュレーションによって再現することができ、油隙中の沿面放電メカニズムの解明に大きく近づくことができた。

第4章では、『エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明』について述べる。近年、環境負荷低減の観点から、生分解性油（植物油やエステル油）を封入した変圧器の適用が進んでいるものの、同油中の絶縁異常や長期劣化におけるデータベースが乏しい状況にあった。そこで、エステル油中に絶縁異常としての金属異物が存在した場合の部分放電特性を取得し、その長さや絶縁構成配置が与える影響について鉱油と比較しながら検討した。その結果、エステル油中の金属針における部分放電開始電圧は、鉱油と同様に、金属針先端の最大電界で決まることがわかった。このことは絶縁設計や絶縁診断に有益な情報となる。

第5章では、『総括』として本研究で得られた成果を総括した。また、将来展望として、今後の少子高齢化や省人化社会に対応するため、監視データを活用したオンライン診断のみならず、実験時間の削減のためのシミュレーション技術を活用した変圧器を「デジタル変圧器」と呼び、デジタル変圧器を適用した「デジタル変電所」の実現にあたっての課題と解決策について述べた。

最後に本研究によって得られた成果について述べる。①放電進展後に形成される白色生成物が絶縁上弱点になることを明確化し、実器の出荷時の課電試験において白色生成物の形成に注意を要することが判明された。②放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の再現によって、油隙中の沿面放電メカニズムの解明に大きく近づくことができた。③エステル油の絶縁異常時のデータベース拡充に向けた異物性部分放電特性の解明によって、世界で初めて植物油中の異物性部分放電特性を解明し、変圧器の絶縁設計時の有益なデータを取得することができた。

# 目次

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>第1章 序章</b>                        | <b>7</b>  |
| 1. 1 はじめに                            | 7         |
| 1. 2 電力用変圧器について                      | 7         |
| 1. 3 電力用変圧器の市場動向について                 | 10        |
| 1. 4 電力用内鉄形変圧器と外鉄形変圧器の違い             | 10        |
| 1. 5 デジタル変電所について                     | 11        |
| 1. 6 各章の研究背景                         | 13        |
| 1. 6. 1 鉱油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明    | 13        |
| 1. 6. 2 放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明    | 15        |
| 1. 6. 3 エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明  | 16        |
| 1. 7 本研究の目的と内容                       | 18        |
| <b>第2章 鉱油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明</b> | <b>20</b> |
| 2. 1 まえがき                            | 20        |
| 2. 2 実験方法                            | 21        |
| 2. 2. 1 電極構成                         | 21        |
| 2. 2. 2 測定系                          | 21        |
| 2. 3 実験結果                            | 22        |
| 2. 3. 1 PDIV, 放電遅れ時間, 放電数            | 22        |
| 2. 3. 2 放電進展速度                       | 28        |
| 2. 3 まとめ                             | 37        |
| 第2章の参考文献                             | 38        |
| <b>第3章 放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明</b> | <b>40</b> |
| 3. 1 まえがき                            | 40        |
| 3. 2 シミュレーションモデル                     | 42        |
| 3. 2. 1 鉱油中の適用式                      | 42        |
| 3. 2. 2 電極表面の適用式                     | 44        |
| 3. 2. 3 解析と実験で使用了モデル                 | 45        |
| 3. 3 シミュレーション結果                      | 50        |
| 3. 3. 1 電界分布                         | 50        |
| 3. 3. 2 第1 油隙における沿面放電シミュレーション        | 52        |
| 3. 3. 3 第2 油隙における沿面放電シミュレーション        | 55        |
| 3. 4 まとめ                             | 59        |
| 第3章の参考文献                             | 59        |

|   |               |
|---|---------------|
| <b>第4章 エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明 .....</b>      | <b>61</b>     |
| 4. 1 まえがき.....                                    | 61            |
| 4. 2 実験方法 .....                                   | 62            |
| 4. 3 実験結果 .....                                   | 64            |
| 4. 3. 1 放電発光像.....                                | 64            |
| 4. 3. 2 印加電圧と放電電荷量.....                           | 67            |
| 4. 3. 3 放電発生電圧および放電発生電界.....                      | 72            |
| 4. 3. 4 絶縁破壊時の金属針先端最大電界 $E_{\max}$ のワイブルプロット..... | 74            |
| 4. 4 まとめ .....                                    | 76            |
| 第4章の参考文献 .....                                    | 77            |
| <br><b>第5章 総括および今後の展望.....</b>                    | <br><b>78</b> |
| 5. 1 総括 .....                                     | 78            |
| 5. 2 今後の展望.....                                   | 81            |
| 5. 2. 1 安価で小形な機種.....                             | 81            |
| 5. 2. 2 MBD を活用した機種設計.....                        | 83            |
| 5. 2. 4 今後の展望のまとめ.....                            | 88            |
| 第5章の参考文献 .....                                    | 88            |

# 第1章 序章

## 1. 1 はじめに

先進国では電気は日常の生活や経済活動にとって当たり前の存在になっていることから、そのありがたさが意識されることはほとんどないが、地球上の全人類 60 億人中 15 億人は、未だに電気の恩恵を全く受けていないと言われている。電気は極めて便利であり、産業活動にとって必要不可欠であることから、先進国では今後も引き続き使用され続け、途上国では電力需要が増加していくことが想定される。

一方、パリ郊外で開催された気候変動枠組み条約第 21 回締約国会議（COP21）では、2020 年以降の地球温暖化対策の新たな国際枠組みであるパリ協定が採択された。1997 年に京都で開催された COP3 で採択された京都議定書に代わり、全ての国が温室効果ガス削減に取り組む新たな枠組みが 18 年ぶりに構築されたことで、世界各国でさらに地球温暖化への対策が着目され、推進されていくことになる。

以上のような、電力需要の増大や地球温暖化対策の必要性などから、今後は世界的に、エネルギーの無駄をなくした「高効率化」というものが重要になってくると考えられる。また、電力エネルギー供給が、経済成長（生産性の向上）には必要不可欠であることから、自国で資源を持たない日本は、安定的なエネルギー供給政策についても考えていかなければならない。

## 1. 2 電力用変圧器について

1.1 で述べた、「安定的で高効率な電力エネルギー供給」において重要な役割を果たすのが電力用機器である。中でも、本論文で取り扱う電力用変圧器は、変電効率に大きく影響するため、「高効率化」の観点からみて、電力インフラの要となっている。電力用変圧器は、電力系統において発電所で発電された電気を中小工場・ビル・公共施設・家庭等、あらゆる箇所に送電するために、各変電所にて使用される。また、図 1-1 に変圧器の基本要素を示す。変圧器は鉄心に 1 次コイル（高圧コイル）と 2 次コイル（低圧コイル）を巻き付けた構造をとる。1 次コイルと 2 次コイルの巻数比（ $N1 / N2$ ）によって電圧を自由に変えることができるのが特徴である。

また、図 1-2 に変圧器の損失内訳を示す。変圧器の損失は大別すると無負荷



損（鉄損）と負荷損（銅損）に分かれる。鉄損は一定周波数の電源電圧が一次側に印加されている限り、二次側の負荷の有無にかかわらず変圧器内で発生する一定の損失であり、ヒステリシス損と渦電流損から構成され、その大きさは変圧器の容量や鉄心の材質によって決まる。一方銅損は、抵抗損と漂遊損から構成される。抵抗損は、 $RI^2$ で表せるため、変圧器によって電圧を上昇させ、電流を少なくするほど銅損は低くなる。また、漂遊損は、巻線に起因するものと、タンク等金属構成物起因するものがある。これらの変圧器損失は、熱の発生の元となる。油入変圧器の寿命を決める支配的要因は、巻線に用いられている絶縁紙の劣化であり、絶縁紙の劣化速度は、アレニウス側に従い、温度が高いと指数関数的に寿命は短くなる。そのため、変圧器の運転温度には上限が定められている。一方、絶縁油も高温で劣化が進むが、液体であるために循環することから高温部分に停まることはなく、絶縁紙と比較すると比較的長寿命である。変圧器の効率は高い（99.7～99.8% 程度）が、扱う電力量が大きいことから、わずかな割合の損失が大きな発熱を生み、変圧器の熱劣化を引き起こす。このことから、内部構造と損失の発生箇所、伝熱経路、冷却方式を考慮した設計を行っている。

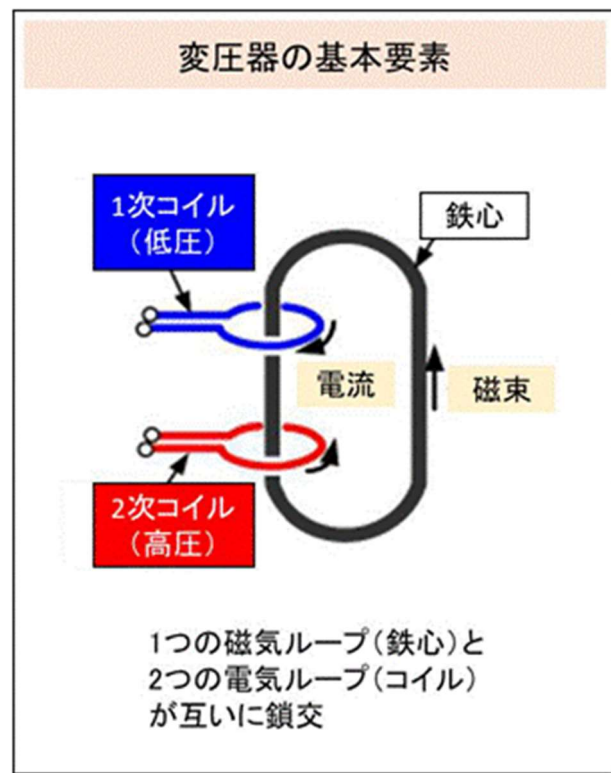


図 1-1 変圧器の基本要素

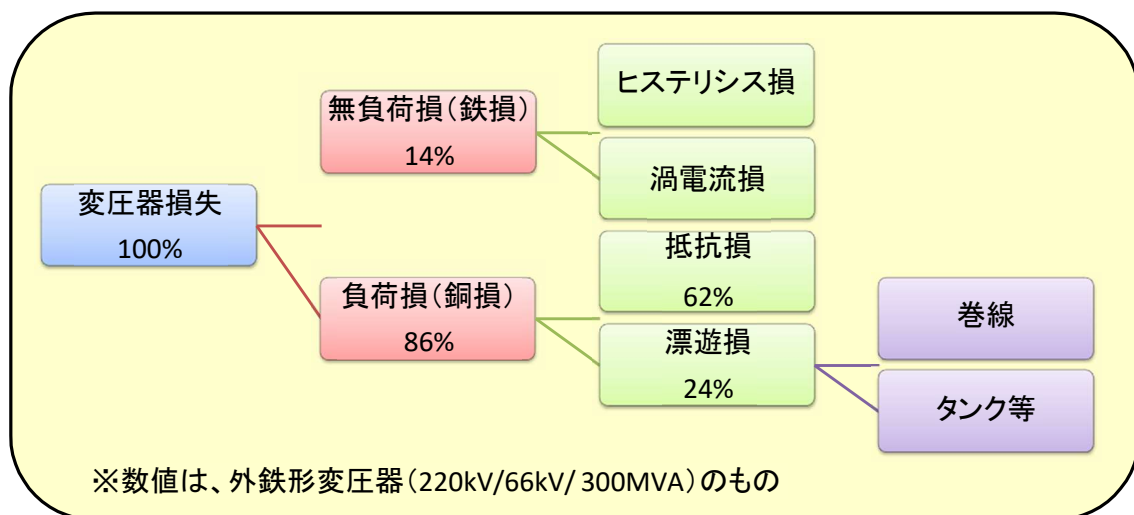


図 1-2 変圧器の損失内訳

### 1. 3 電力用変圧器の市場動向について

国内の電力用変圧器の市場動向として、高度成長期以降、電力用変圧器の導入数は増えており、現在に至るまでに30年以上使用されているものも市場に存在するのが現状である。一方、変圧器の寿命は油の劣化よりも高圧・低圧コイルの絶縁のために用いられる絶縁紙の劣化によって決まり、絶縁紙の重合度によって評価される。また、その寿命は30年ほどで設計されているが、現在市場に出ている電力用変圧器は40年以上経過しても使用され続けているものもあり、今度、その更新期が増えていくことが想定されている。なお、日本における電力会社の総需要は、2015年度の見込みで約570億円/7年であり、14年度に比べ1.25倍増加し、18年度までには、1.5倍にまで増加すると予測されている。市場価格は2011年の震災後に急落したものの、14年度以降には大きな下落がなく、電力の小売自由化と発送電分離の実施に伴い、今後の需要は拡大すると見込まれている。

### 1. 4 電力用内鉄形変圧器と外鉄形変圧器の違い

変圧器は、1次コイルと2次コイルの配置の違いにより内鉄形変圧器と外鉄形変圧器に分類される。各変圧器の利点と欠点は、表1-1の通りである。

①外鉄形は、鉄心の周りに低圧巻線・高圧巻線を交互に配置しており、内鉄形と比較して、巻線重量に対する鉄心重量の割合が大きくなる。

②内鉄形では、一次（入力側）巻線と二次（出力側）巻線を主として同心配置とするのに対し、外鉄形では交互配置とする。

③内鉄形のほうが構造は簡単で製作も容易である。

④外部短絡が起きた場合に生ずる大電流による機械力に耐えるように製作するためには外鉄形のほうが有利である。

本論では、内鉄形変圧器について検討したため、以後、内鉄形変圧器を対象に議論を展開する。

表1-1 各変圧器の利点と欠点

|    | 外鉄形変圧器     | 内鉄形変圧器       |
|----|------------|--------------|
| 利点 | 高効率。機械力に強い | 構造が簡単で、製作も容易 |
| 欠点 | 構造が複雑      | 外鉄に比べて損失大    |

## 1. 5 デジタル変電所について

本節では、従来の変電所と現在提唱されている「デジタル変電所」の違いについて説明する。図 1-3に従来の変電所の構成例を示す。既存の変電所は、変圧器や遮断器などの変電設備、変電設備を操作する操作盤、変電設備の監視情報を収集する監視制御装置によって構成される。各変電設備間や装置－主器間には多数の制御ケーブルが敷設されており、設備更新毎に工事が発生するため、工事期間の短縮が図れないといった課題があった。また、設備点検などの変電所運用は保守点検作業員によって行われることが多く、将来的な少子高齢化を見据えた効率的な運用手法の確立が求められている。また、変圧器や遮断器などの変電設備は、一度使用が開始されると内部の確認は容易ではないため、外部からの劣化兆候の検出と劣化診断による機器の健全性のリアルタイム監視が求められている。また、近年では、既設変電設備の劣化状況を把握し、効率的な設備更新計画の策定も求められている。

以上を踏まえ、以下①～③の機能を備えた変電所のことを「デジタル変電所」と呼び、現在各所で適用が進んでいる。図 1-4 に、現在提唱されている「デジタル変電所」の概念図を示す。

- ① デジタルネットワーク化による省配線と設備構成の最適化
- ② 劣化兆候の検出と劣化診断による機器の健全性のリアルタイム監視
- ③ 変電設備の劣化状況の把握による高効率な設備更新計画の策定

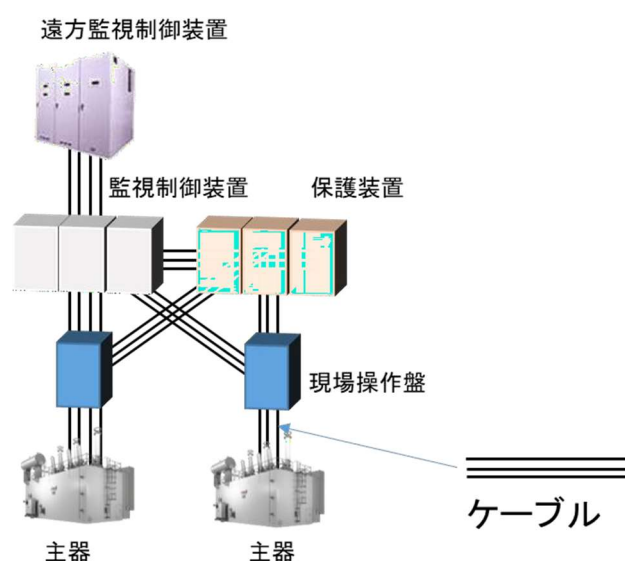


図1-3 従来の変電所

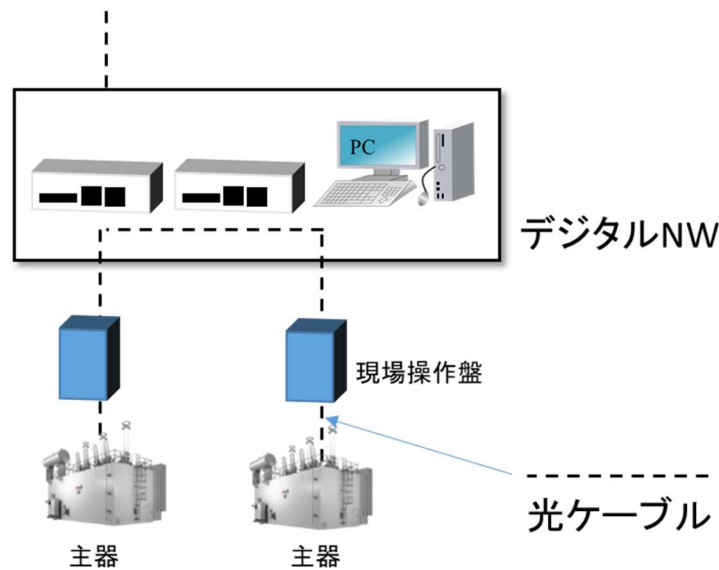


図1-4 現在提唱がされている「デジタル変電所」

一方、高度経済成長期に大量導入された電力用油入変圧器の運用が30年以上超過していることから、鉱油や絶縁紙の寿命を考慮して更新が推奨されている。そのため、今後増加傾向にある更新器については、経済性の観点から小形の要望が高まっている。さらに、鉱油は、廃油時にCO<sub>2</sub>を大量に排出し、生分解性も23%であるために漏洩時の環境汚染のリスクが高いことから、最近では、持続可能社会の実現に向けて廃油時のCO<sub>2</sub>排出量が少なく生分解性も99%と高い油として、エステル油の適用が進んでいる。

そのため、次世代のデジタル変電所開発においては、今後増加傾向の更新器を念頭に、変電所内の電力設備の中心的役割を担う電力用油入変圧器の更なる小形化、高効率化、高信頼化に向けたその内部の絶縁特性の抜本的な改革が重要であり、その一環として絶縁破壊の前駆現象として知られている部分放電メカニズムの解明が重要となっている。また、鉱油の代替となる環境調和型エステル油中の部分放電特性の解明も重要となっている。

以上の背景から本研究では、部分放電メカニズムの解明として、絶縁油と固体絶縁材料の界面における沿面放電進展特性の解明検討、およびその数値解析シミュレーションを世界で初めて構築した。また、鉱油の代替となる環境調和型エステル油中の部分放電特性の解明、および変圧器のデジタル化を実現する上での課題と解決方法について論じたため、第2章以降で述べる。

## 1. 6 各章の研究背景

### 1. 6. 1 鉱油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明

図 1-5 に内鉄形変圧器の簡易的な構造を示す。鉄心とコイルが絶縁媒体である油や SF<sub>6</sub> ガスで満たされたタンク内に配置される。また、リードと呼ばれる印加線を使ってコイルに電圧が印加され、ブッシングを通して高圧系統・低圧系統に接続される。また、図 1-6 に内鉄形変圧器の断面図を示す。図 1-6 に示すように、低圧コイルと高圧コイルの間には、プレスボード (Pressboard, 以下 PB) と呼ばれる絶縁紙が配置され、油と PB の複合絶縁を用いることで、その絶縁性能を向上させている。

1.3.で述べた通り、30 年以上の運用された電力用変圧器は今後適宜更新されていき、その数も年々増えることが想定されるが、今後、変圧器を更新する場合、経済性の観点から小形であることが望ましい。

しかしながら、変圧器を小形化した場合、高圧コイルや低圧コイルの端部の電界が高くなり、絶縁上弱点となることが知られている。そのため、変圧器を小形化する際には、電力用内鉄形変圧器内部の油と PB 複合絶縁系における絶縁性能を把握し、変圧器の故障の原因となる放電発生を抑制することが重要である。

油と PB の複合絶縁系における絶縁性能の把握に向けた検討については、これまで数多くの検討がされており、著者らも高圧コイルと低圧コイルのバリア絶縁を模擬した電極を用いて、沿面放電進展特性について検討を行っている。また、油/PB 複合系において雷 IMP 電圧を繰り返し印加すると、沿面放電が同じ経路で進展すること、放電発生後には放電経路に沿って白色生成物が残り、絶縁上弱点になる可能性があると報告している。本論では、放電進展後に形成される白色生成物が放電進展速度・部分放電開始電圧に与える影響について解明したため、第 2 章にて述べる。

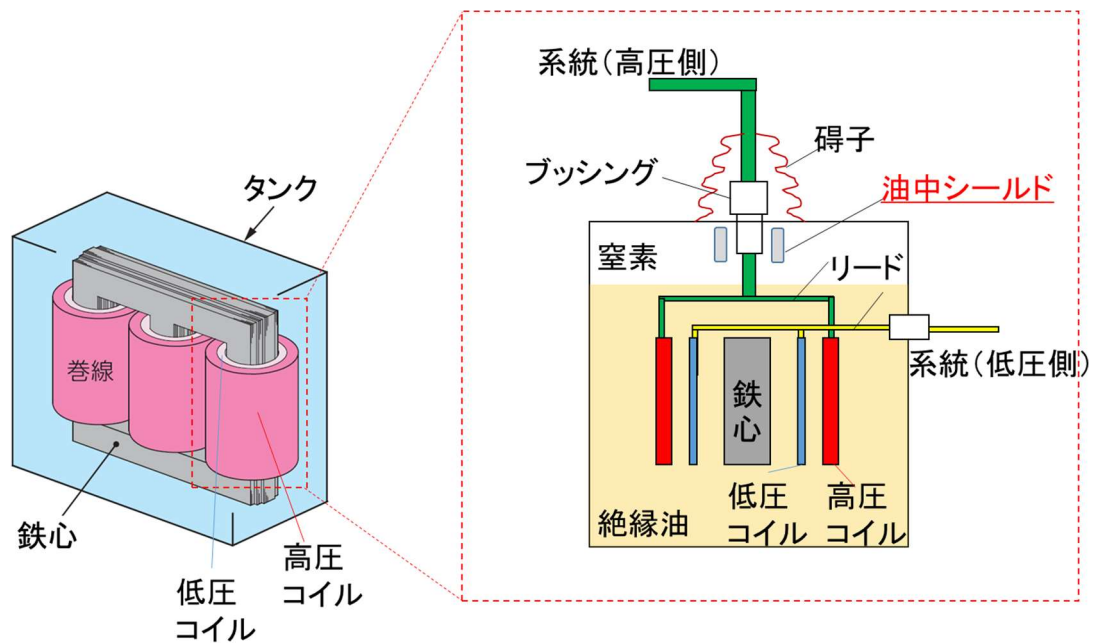


図1-5 内鉄形変圧器の基本的な構造

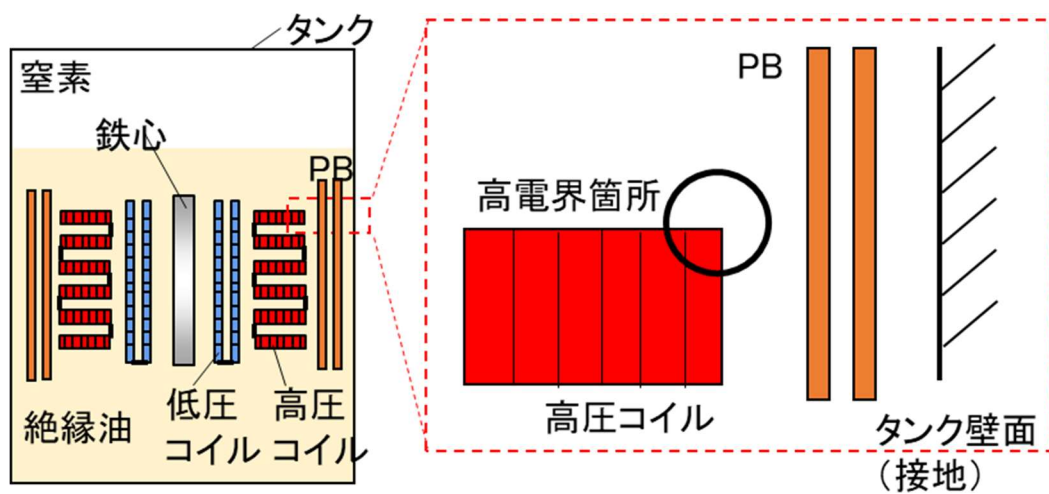


図1-6 内鉄形変圧器の断面図

## 1. 6. 2 放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明

油-PB 複合絶縁系の放電現象は、放電の発生および進展の 2 段階に大別できる。著者らはこれまで、電力用油入変圧器で一般的に用いられる絶縁油—プレースボード（以下 PB）複合絶縁系における雷インパルス電圧印加時の放電起点・進展特性を明らかにしてきた<sup>[1,2]</sup>。さらに最近では、数値解析を用いた放電現象の解明も行われている。例えば Lee らは、油中の PB 上に配置した針-棒電極にて、電荷連続の式、ポアソンの式を導入した数値解析シミュレーションを行い、電流密度や放電進展速度の計算結果の妥当性を実験結果との比較により示している<sup>[3,4]</sup>。また、Zahn らは、油中沿面放電の進展速度や電界強度に支配的となる因子は、ストリーマ中のイオン化であると数値解析シミュレーションと実験結果の比較により示している<sup>[5]</sup>。

一方、電力用油入変圧器においては、油隙の絶縁耐力向上を目的に、絶縁油の E-d 特性や放電進展抑制効果を考慮して油隙が複数のバリア PB で分割される。そのため、電力用油入変圧器における油中放電メカニズムを解明しようとする、バリア PB による放電抑制効果についても検討することが重要である。

そこで、これまで著者らは、バリア PB による放電進展の抑制効果を解明するため、高圧電極と低圧電極間に L 字形のバリア PB を設置した電極系で検討を行い、その結果、沿面放電がバリア PB にまで進展した際に、バリア PB を貫通破壊することなく、バリア PB を介した油隙で放電が発生することを明らかにした<sup>[5]</sup>。また、その原因を、高圧電極から進展した放電によって第 2 油隙におけるバリア PB のくさびギャップ部の電界が強調され、バリア PB のくさびギャップの電界が放電発生電界に到達することで、第 2 油隙でも放電が発生したものと推定した<sup>[6]</sup>。

ただし、上記推定は、有限要素法を用いた電界解析ソフト（ElecNet）を用いた静電界解析によって行っており、放電の進展する現象や、それによる電界分布の変化をシミュレーションで再現することはできず、上記推定の妥当性検証は未実施であった。

そこで、複数のバリア PB を用いた油-PB 複合絶縁系において沿面放電シミュレーションを実施し、これまで著者らが取得した実験結果と比較することで、上記推定の妥当性を検証し、絶縁油中の沿面放電メカニズムの解明を目的に検討した結果について第3章で述べる。



### 1. 6. 3 エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明

変圧器内の電力損失は熱となって巻線および鉄心の温度を上昇させる。このため、絶縁油または空気等で冷却し、さらに冷却効果をますために冷房装置を取り付けている。変圧器の冷却方式は、巻線および鉄心を直接冷却する媒体、ならびにそれをさらに冷却する周囲の冷却媒体の種類と循環方式によって、油入自冷式、油入風冷式、油入水冷式、導油自冷式、導油風冷式、導油水冷式等に分類できる。

油入自冷式は絶縁油の対流作用および冷却器表面の空気の自然対流により冷却する方式で、さらに冷却器の表面を冷却ファンによって強制冷却する方式が油入風冷式である。導油自冷式は、絶縁油を送油ポンプによって冷却器に強制的に導いて冷却する方式で、さらに冷却ファンによって強制冷却する方式が導油風冷式である。導油水冷式は周囲の媒体が水の場合で、水を強制循環させて冷却する方式である。図 1-7 に変圧器の冷却路の例を示す。変圧器の下部から上部に向けて絶縁油が流れ、巻線および鉄心を冷却する。

ここで、仮に絶縁油中に金属性の異物が混入した場合、絶縁油の流れに乗って金属性の異物が高圧コイルと低圧コイル間の高電界部に接近する可能性がある。図 1-8 にコイル間に金属異物が接近したイメージ図を示す。

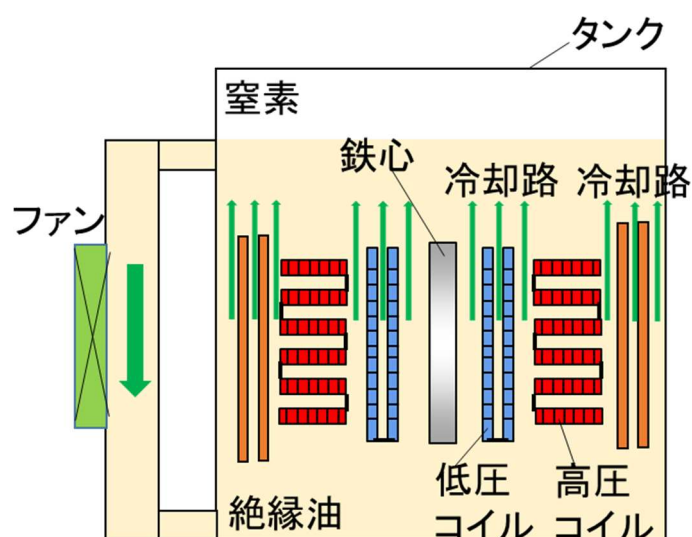


図1-7 変圧器の冷却路の例

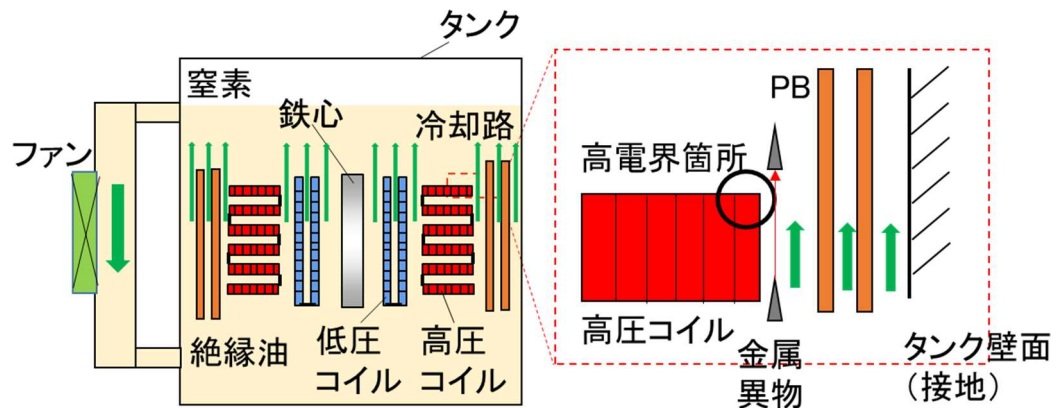


図1-8 コイル端部に金属異物が接近したイメージ図

コイル間は基本的には平等電界が形成されるが、平等電界下に金属性の異物が存在すると、金属性の異物表面で電界が局所的に増倍することが知られている[7,8]。

一方、最近では、環境負荷低減への意識の高まりから、植物油入変圧器の導入が進んでいる。植物油入変圧器についても、金属性の異物を考慮した設計・製造が行われているが、植物油中に金属性の異物が混入した場合の放電特性について、鉱油ほど報告された例はない。

そこで、エステル油中に絶縁異常としての金属異物が存在した場合の部分放電特性を取得し、その長さや絶縁構成配置が与える影響の取得を目的に検討を行った。今回、平板電極間に PB を配置し、片側の PB 上に金属針が配置された系において AC 電圧印加時の放電発生電圧について評価した結果について第4章で述べる。

## 1. 7 本研究の目的と内容

以上を踏まえ、次世代デジタル変電所開発に向け、変電所内の電力設備の中心的役割を担う電力用油入変圧器の更なる小形化、高効率化、高信頼化のためにはその内部の絶縁特性の抜本的な改革が重要であり、その一環として絶縁破壊の前駆現象として知られている部分放電メカニズムの解明が重要となっている。また、次世代デジタル変電所開発においては、持続可能社会の実現に向け、鉱油の代替となる環境調和型エステル油中の部分放電特性の解明も重要となっている。以上より、本研究では、以下（ア）～（ウ）について検討を行った。

絶縁油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明（2章）

放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明（3章）

エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明（4章）

第2章では、（ア）絶縁油/プレスボード複合系における沿面放電特性について検討を行った。本研究の着手時には、油/プレスボード複合系において雷インパルス電圧を繰り返し印加すると、放電発生後に放電経路に沿って白色生成物が残り、絶縁上弱点になるという懸念があった。そこで第2章では、その白色生成物の正体解明と放電特性への影響の把握を目的に検討を行った。今回、ストリークカメラ、光電子増倍管、および電流パルス検出を用いて雷インパルス電圧印加下における沿面放電進展速度、部分放電開始電圧を測定し、白色生成物がそれらに与える影響について評価したため、その結果について述べる。

第3章では、（イ）放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象について検討を行った。本研究の着手時には、複数のバリアプレスボードを用いた油/プレスボード複合絶縁系におけるインパルス沿面放電メカニズムの解明が課題であった。そこで、沿面放電メカニズムの解明を目的に、プレスボードで形成された2つの油隙を有するモデル電極を用いた実験系に対して、有限要素法を用いた数値解析シミュレーションを行った。今回、インパルス沿面放電の計算モデルには一般的なポアソン式、電荷連続式、熱拡散方程式に加えて、複合絶縁系特有の電極からの電子放出および絶縁物表面の空間電荷形成などの各種パラメータをナノ秒オーダーの時間・空間分布として計算に考慮し、放電進展速度や、沿面放電進展時の放電先端電界について評価したため、その結果について述べる。

第4章では、（ウ）エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性について検討を行った。本研究着手時には、環境負荷低減の観点から、生分解性油（植物油やエステル油）を封入した変圧器の適用が進んでいるものの、同油中の絶縁異常や長期劣化におけるデータベースとして、異物性部分放電特性や油中放電に伴うガス発生に関するデータが乏しい状況にあった。そこで本章では、エステル油中に絶縁異常としての金属異物が存在した場合の部分放電特性を取得し、その長さや絶縁構成配置が与える影響の取得を目的に検討を行った。今回、電力用油入変圧器の主絶縁部を模擬した電極系において、平行平板電極間の油隙長が9 mmとなるように平板PBを配置し、片側のPB上に金属針が配置された系において、金属針の長さを4,6,8 mmと変化させ、AC電圧印加時の放電発生電圧について評価したため、その結果について述べる。

#### 第1章の参考文献

- [1] T. Akahosi et al, “Effect of White Discharge trace on Impulse Creeping Discharge Characteristics in Oil/Pressboard Composite Insulation System,” IEEJ Trans. Fundamentals Materials (FM), vol. 137, no. 4, pp. 188–195, 2017.(in Japanese)
- [2] 吉田成是, 「油プレスボード複合絶縁システムにおける雷インパルス電圧印加時の放電特性」平成24年電気学会静止器研究, SA-12-121, pp.7-12, 2012
- [3] Ho-Young Lee and Se-Hee, “Numerical analysis for surface discharge on solid insulation in the dielectric liquid and experimental validation”, Korea-Japan Joint Symposium in Mokpo, 2015
- [4] Ho-Young Lee and Se-Hee, “Fully Coupled Finite-Element Analysis for Surface Discharge on Solid Insulation in Dielectric Liquid with Experimental Validation”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.52, No.3, 2016
- [5] M.Zahn, J.Hwang, F.Sullivan, O.Hjortstam, L.Pettersson, R.Liu, P.Biller “A Model for the Initiation and Propagation of Positive Streamers in Transformer Oil” International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp. 210 – 214, 2008
- [6] 吉田成是, 「油プレスボード複合絶縁系における絶縁バリアを介した雷インパルス油中沿面放電特性」平成27年電気学会全国大会, 2015
- [7] 電気工学ハンドブック
- [8] 電気磁気学Iオーム社
- [9] 和田ら, 「変圧器油の部分放電開始電圧特性に与える金属先端形状の影響」平成19年電気学会全国大会, 1-025

## 第2章 鉱油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明

### 2. 1 まえがき

電力用油入変圧器は、絶縁性能を向上させるために、絶縁媒体として油/プレスボード（以下、PB）複合システムを採用している。しかしながら、隣接する絶縁媒体間の誘電率の違いにより、高電界下では沿面放電が起りやすくなるため、電力用油入変圧器の油/PB 界面は電氣的弱点になりえることも知られている<sup>[1-4]</sup>。Wang らは、一旦 PB 表面を沿面放電が進展すると木の枝のような損傷跡が残るため、AC 電圧は長期間課電されることから、損傷痕が永続的な導電経路となり、変圧器の絶縁システムにおける故障モードの 1 つになると報告している。また、損傷痕が形成される前に、PB 表面に白い木の枝のようなマーク（以下、白色生成物）が現れる傾向があるとも報告しており<sup>[5]</sup>、油入変圧器内部における白色生成物の特性を理解することが重要である。

これまで、著者らも、油/PB 複合系において雷インパルス電圧（以下、雷IMP電圧）を繰り返し印加すると、沿面放電が同じ経路で進展することを報告している。また、放電発生後、放電経路に沿って白色生成物残り、絶縁上弱点になる可能性があるとも報告している<sup>[6]</sup>。

ここで、油入変圧器の絶縁試験では、短時間の AC 課電試験に続いて、長期の AC 試験と雷 IMP 試験を行い、その後に裁断波試験を行う。特に裁断波試験の場合、雷 IMP 電圧の 1.1 倍の電圧が印加される。雷 IMP 試験で白色生成物が形成された場合、白色生成物により試験した油入変圧器の絶縁性能が低下し、裁断波試験で絶縁破壊が生じる可能性がある。特に、裁断波試験では、波尾をカットした形状となっている。したがって、特に雷 IMP 試験の波頭付近における白色生成物有無での放電特性を理解することが重要である。これまで著者らは、デジタルカメラ、電流測定、および光電子増倍管（PMT）を使用して、雷インパルス電圧下での放電生成物がある場合とない場合の放電特性を明らかにしてきた。一方、雷 IMP 電圧を印加したときの波頭付近の放電特性を明らかにするためには、ストリークカメラを使用して放電伝播の速度を明らかにすることが重要である。

そこで本論文では、白色生成物形成前後の部分放電開始電圧（Partial Discharge Inception Voltage : 以下、PDIV）について調査した。また、高速光学観測・電気測定システムを用いて、放電伝搬特性の比較検討も行い、白色生成物が放電発生特性に与える影響について評価した。

## 2. 2 実験方法

### 2. 2. 1 電極構成

図 2-1 に沿面放電進展抑制モデルの電極構成を示す。高電圧電極には、先端曲率半径 3 mm のタングステン棒電極を使用した。また、接地電極には、高さ 20 mm、幅 50 mm、エッジ半径 10 mm の電極を使用した。また、背後電極として、半径 1mm の銅線を使用した。背面電極の上に、厚さ 1.6 mm の平面PB と、高さ 40 mm の厚さ 1.6 mm のバリアPB を配置した。図 に示すように、高電圧電極とバリアPB の間の油隙は 50 mm にした。

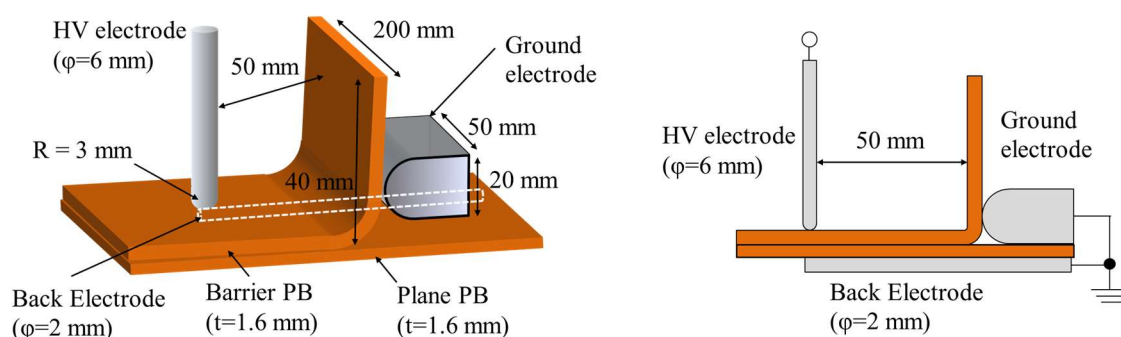


図 2-1 電極系

### 2. 2. 2 測定系

図 2-2 に今回使用した測定系を示す。真空脱気注油した鉱油中に電極系を配置した。標準雷 IMP 電圧を印加した。電圧の印加開始電圧を 50 kV とし、2 kV ステップで 110 kV まで上昇させた。昇圧法で初めて得られた PDIV を First-PDIV とし、光電子増倍管 (Photomultiplier tubes : PMT) 2 本と検出抵抗  $50\Omega$  を用いて放電光と電流をそれぞれ測定した。白色生成物形成後に、正極の雷 IMP 電圧を 50 kV から 110 kV まで階段状に繰り返し印加し、2 回目の昇圧時に得られた PDIV を Second-PDIV とし、デジタルカメラ(富士フイルム, Finepix S100 FS) を用いて放電画像を取得した。ISO と露光時間をそれぞれ 1600 と 6 秒に設定した。

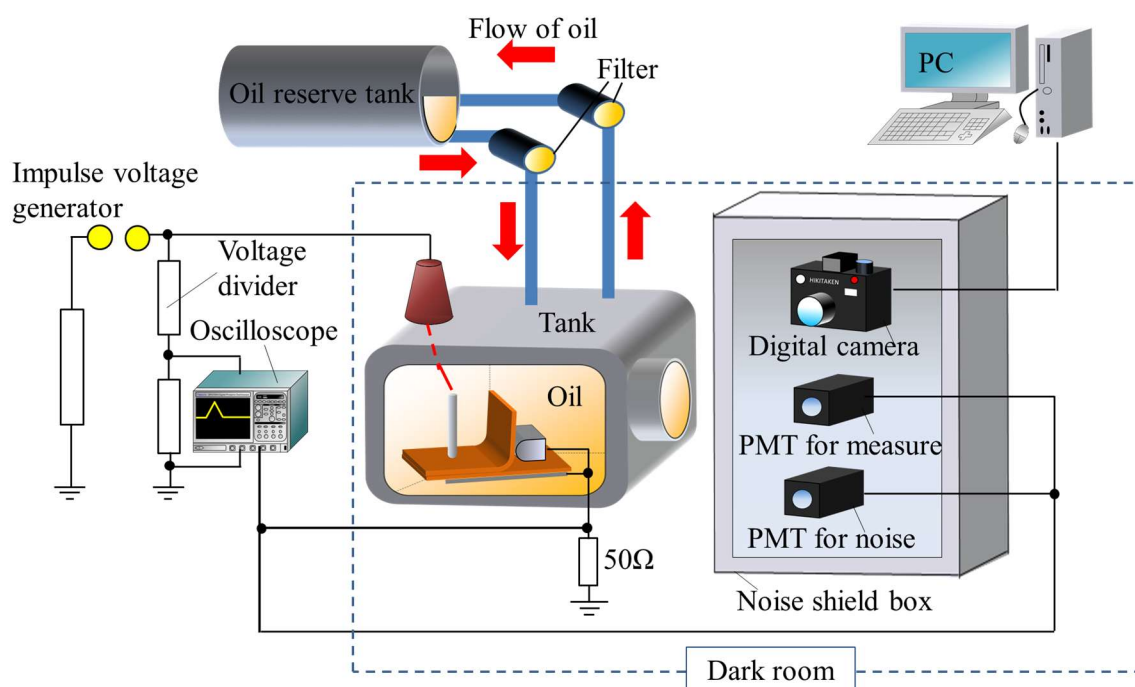


図2-2 測定系

## 2. 3. 実験結果

### 2. 3. 1 PDIV, 放電遅れ時間, 放電数

図 2-3(a)～(d) に放電発光像と白色生成物を示す。図 2-3(a)および図 2-3(b)は 80 kV, 104 kV での放電発光像を示している。また, 図 2-3 (c)は白色生成物を示している。図 2-3 (c)に示すように, 104 kV を印加した後, 高電圧電極付近の PB 上に白色生成物が形成されており, 試験後に目視で確認することもできた。また, 白色生成物が形成されると, 図 2-3 (d) に示すように, 放電が白色生成物上を伝播していた。なお, 白色生成物は 120 分後に自然に消失し, 気泡が拡散した後, PB 表面に物理的損傷はなかった。



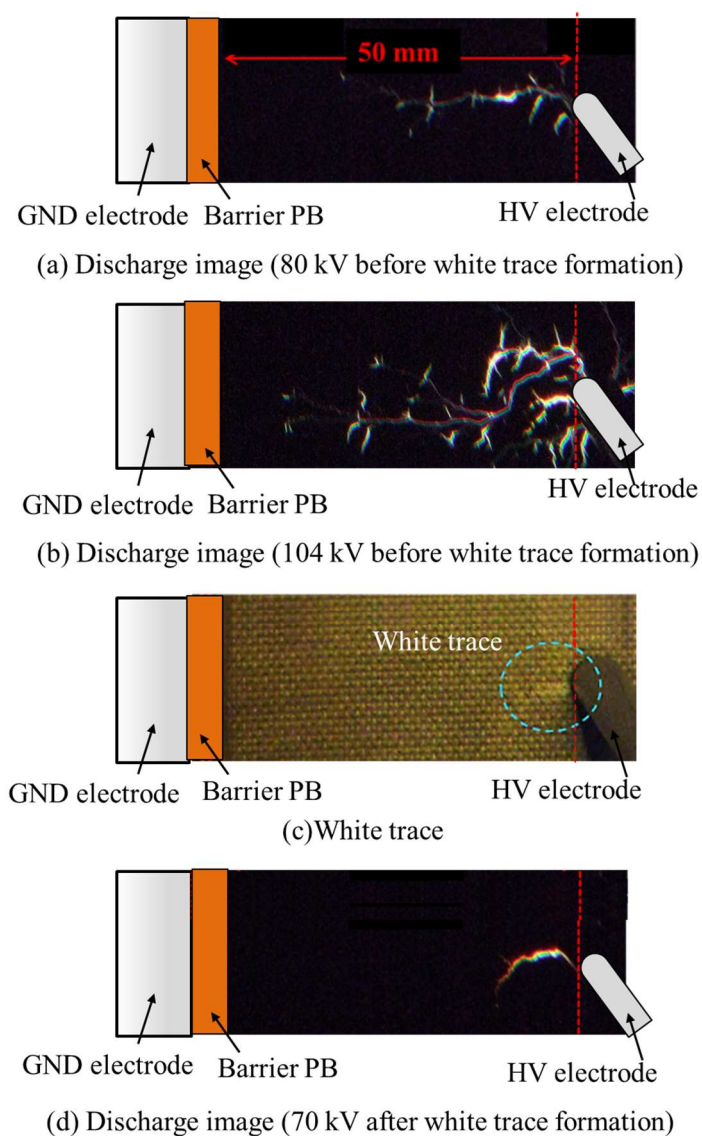


図2-3 放電発光像および白色生成物

図 2-4(a)および図 2-4(b)は、それぞれ、80 kV 印加時の First-PDIV および 70 kV 印加時の第 Second-PDIV における PMT、放電電流、印加電圧により検出された発光の放電画像の典型的な波形を示している。PD の発生は、PMT と放電電流の信号を同時に観測した場合に判定し、PMT で検出されなかった信号をノイズと判定した。図 2-4(a)に示す通り、PD 時には複数のパルスが発生しており、放電は電極に向かって約 20 mm 進行していた。また、図 2-4(b)に示す通り、Second-PDIV におけるパルス数は、First-PDIV におけるパルス数に比べて減少していることが分かる。また、Second-PDIV では、放電の進行がほとんど見られなかった。これまで、油/PB 複合絶縁系における交流電圧下において、放電



により油や水が蒸発し、PBのセルロース層に気泡がトラップされ、白色生成物が観察されることが報告されている<sup>[7-9]</sup>。また、部分放電が発生したときの印加電圧  $V_a$  と電流測定で求めた見かけの放電電荷量  $Q$  を用いて、放電エネルギー  $W$  を算出することができる。図 2-4(a)より、PD パルスは、80 kV 印加時の雷 IMP 電圧 ( $t=5$  から  $17\mu s$ ) の波尾部で検出されていることがわかる。この部分放電の電荷放出エネルギー  $W$  を式 (2-1) を用いて計算したところ、 $2.6 \times 10^{-3}$  J であった。放出エネルギー  $W$  は、すべてのエネルギーが油の蒸発のために消費されたと仮定すると、蒸発した油の量は式 (2-2) によって与えられ、 $8.9 \times 10^{-6}$  cm<sup>3</sup> と算出することができる。ここで、 $v_{oil}$  は液体状態の蒸発した油の体積、 $\rho$  は油の比重 ( $0.88$  g/cm<sup>3</sup>)、 $c$  は油の比熱 ( $1.892$  J/gK)、 $T_{oil}$  は油の沸点 ( $200$  °C まで)、 $T_0$  は室温 ( $\sim 25$  °C) である。一般に、液体油の体積が気体になると約 100 倍増加することが知られているため、気化した油の体積  $v_{gas}$  は  $8.9 \times 10^{-4}$  cm<sup>3</sup> と推定することができる。放電進展経路が白色生成物と一致する長さは約 10 mm であり、白色生成物の幅は 80 kV 印加時に約 1.5 mm と測定できることから、厚さを 0.1 mm と仮定すると、白色生成物の体積は  $1.0 \times 10^{-3}$  cm<sup>3</sup> と推定することができるため、白色生成物の体積と、ガス化したと仮定した油の体積はほぼ一致した。以上の結果から、白色生成物は放電エネルギーによって蒸発した PB 中のガスであると考えられる。

図 2-5 に、雷 IMP 電圧  $V_a$  印加時における First-PDIV および Second-PDIV をそれぞれ示す。図 2-5 に示すように、First-PDIV の平均値は 71.6 kV、Second-PDIV の平均値は 62.8 kV であった。図 2-6 に白色生成物形成前後の放電遅れ時間  $t_d$  のラウエプロットを示す。図 2-6 の横軸は、 $t_d$  まで放電が発生しない確率  $\{n(t)/n\} \times 100$  [%] と定義している。図 2-6 に示すように、白色生成物形成後の  $t_d$  は、白色生成物形成前の  $t_d$  よりも小さく、 $t_d$  の平均は 36.0 % に低減していることがわかる。

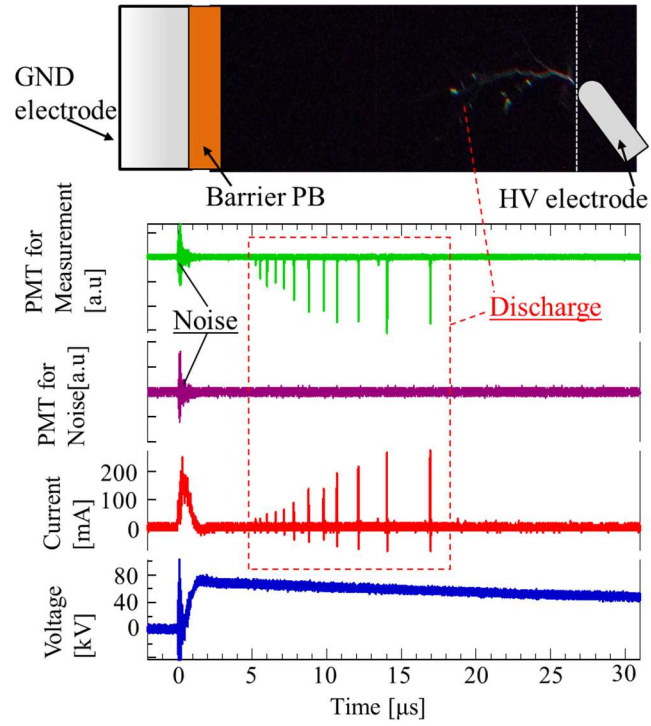
また、104 kV を印加すると、図 2-3 (c) に示すように、PB 表面には背面電極に沿って白色生成物が形成された。前述したように、白色生成物は放電によって生成された分解ガスであり、微小な気泡として PB 表面に残る。ガスは鉱物油に比べて誘電率が低いため、ガス中では分担電圧が高くなる。そのため、図 2-3 (d) に示すように放電が白色配線に沿って発生し、図 2-5 に示すように PDIV が低下するとともに、電子雪崩形成による放電遅れ時間が絶縁媒体に依存し、ガスの PDIV が鉱油の PDIV よりも小さいため、過電圧比が大きくなり、電子雪崩

の成長が速くなる。そのため、図 2-6 に示すように、白色生成物形成によって放電遅れ時間が短くなったと考えられる。

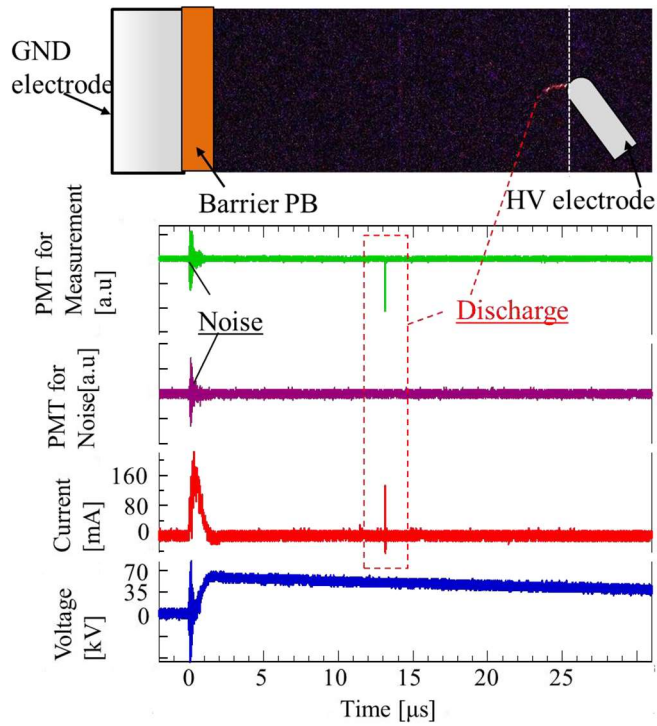
また、図 2-7 に放電パルス数の比較を示す。Second-PDIV で放電パルス数は減少した。白色生成物を形成する前は、図 2-3 (a)に示すように放電パルス数が多く、放電パルス数も多い。一方、白色生成物が形成された後は、白色生成物上を放電が進展するため、放電分岐数が減少し、放電パルス数が減少したと考える。

$$W = Q \times V_a / 2 \quad (2-1)$$

$$W = v_{oil} \times \rho \times c \times (T_{oil} - T_0) \quad (2-2)$$



(a) First-PDIV (at 80 kV)



(b) Second-PDIV (at 70 kV)

図2-4 放電発光像および電圧波形および PMT 波形

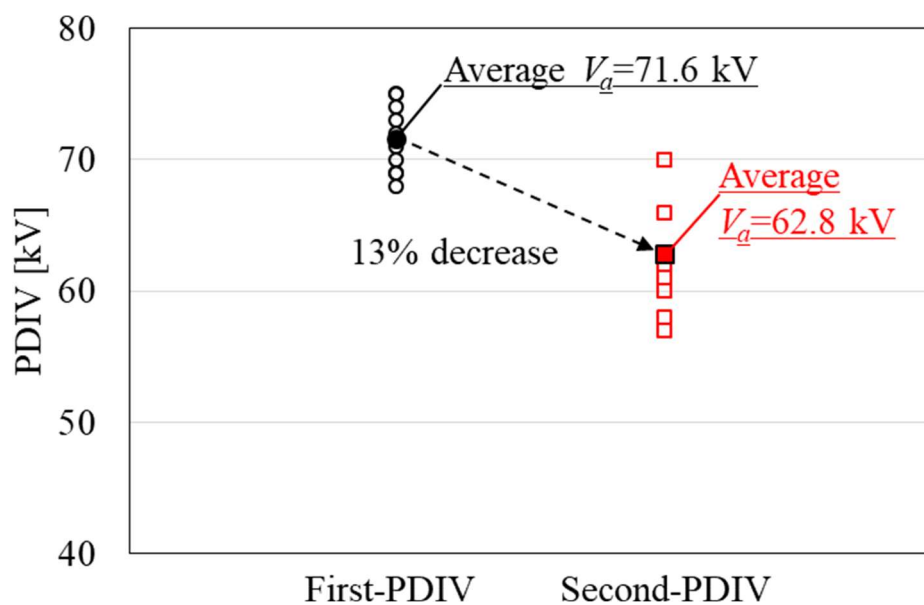


図2-5 First-PDIV と Second-PDIV の比較

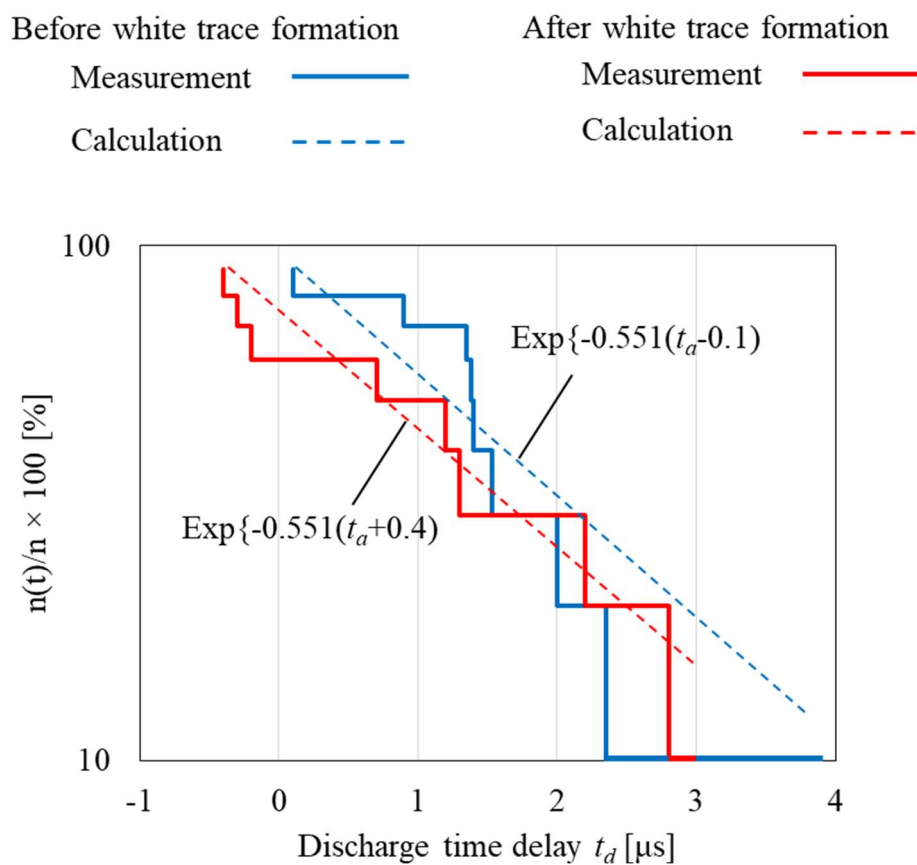


図2-6 80kV 印加時における放電遅れ時間 $t_d$ のラウエプロット

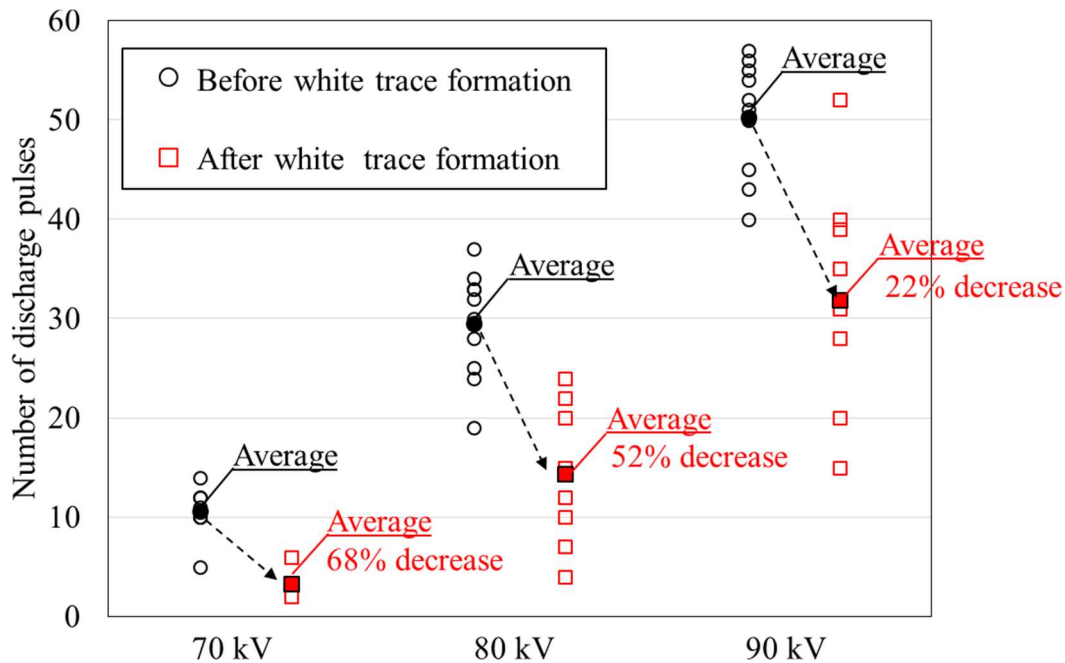


図2-7 放電パルスの比較

### 2. 3. 2 放電進展速度

80 kV 印加時における放電生成物形成前後における放電進展速度について、ストリークカメラを用いて測定した。図 2-8 および図 2-9 に、白色生成物形成前における正極性および負極性の雷 IMP 電圧 80 kV を印加したときのストリーク像および取得波形をそれぞれ示す。PMT 波形と放電電流波形の信号発生タイミングを同時に測定した。図 2-8 および図 2-9 に示す通り、沿面放電は間欠的かつ段階的に発生することがわかる。間欠的に進展する放電メカニズムとして、衝突電離によってストリーマ放電が始まり、空間電荷を放出した後、正イオンと電子が再結合して発光する (図 2-10(a))。残留空間電荷は局所的に蓄積する (図 2-10 (b))。その後、蓄積された空間電荷領域に電子が引き寄せられ、さらなるイオン化が起こり、再び発光する (図 2-10 (c))。このプロセスを断続的に繰り返し、沿面放電が進展する。沿面放電の平均進展速度は断続的に進行するストリーク像の傾きから推定し、正及び負の雷 IMP 電圧印加に対してそれぞれ  $4.5 \times 10^3$  及び  $2.0 \times 10^3$  m/s であった。例えば、図 2-8 では  $10 \mu\text{s}$  の間に 45 mm の放電が進行しているので、 $4.5 \times 10^3$  m/s と計算できる。表 2-1 に油中における沿面放電進展の過去例を示す。一般的に、油中における PB 表面に沿った沿面放電速度は正極性の場合に約  $10^3$  m/s であり、負極性の場合には正極性よりも 1/2 となっていることが報告されている。負極性の場合、電子は PB 表面にトラップされやすく、

負極性の沿面放電進展が進展しにくいと報告されている<sup>[10-13]</sup>。

図 2-11 および図 2-12 は、それぞれ、白配線形成後における 80 kV 印加時の正および負雷 IMP 印加時のストリーク像および取得波形を示す。図 2-11 および図 2-12 に示すように、放電は白色生成物に沿って一発で進行することができる。

図 2-13 および図 2-14 は、それぞれ、白色生成物形成後における 100 kV 印加時の正および負雷 IMP 印加時のストリーク像および取得波形を示す。図 2-13 および図 2-14 より、一発で白色生成物上を放電が進行し(図 2-13(α), 図 2-14 (α)), 数 $\mu$ s 後に白色生成物のない場所でステップ状の放電が進行している(図 2-13(β), 図 2-14 (β))ことが分かる。なお、白色生成物のないところにおけるステップ状放電の進展速度は  $2.0\text{--}5.0\times 10^3$  m/s であった。これは白色痕跡形成前(図 2-8 および図 2-9)の進展速度と同じオーダーであった。一方、白色生成物上の放電進展速度は、50 ns で進展しており、白色生成物がないところにおける放電進展速度と比較して早くなった。

次に、ストリークカメラの掃引速度をさらに増加させ、白色生成物上を進展する放電一発の測定を試みた。図 2-15 および図 2-16 は、掃引時間 2.5 ns/mm における白色生成物形成後、100 kV における正および負極性の雷 IMP 電圧におけるストリーク像および取得波形を示す。放電進展速度はストリーク像の傾きから約  $3.0\times 10^6$  m/s と算出できる。白色生成物形成後の放電進展速度は白色生成物形成前の進展速度の約 103 倍であった。表 2-2 にガス中の沿面放電進展速度を示す。大気中における一般的な沿面放電進展速度<sup>[14-16]</sup>のオーダーと一致することがわかる。従来、油/PB 複合絶縁系では交流印加下において沿面放電によって油や水が蒸発し、PB のセルロース層に気泡がトラップされて「白色生成物」が観察されることが報告されている<sup>[8-10]</sup>。さらに、一旦白色生成物が形成されると、放電は低電圧でも成長し続け、最終的に短絡破壊に至ることが報告されている<sup>[8]</sup>。前節において、沿面放電進展後に白色生成物が形成された場合、雷 IMP 電圧印加下でも PDIV が同様に減少することを確認した。また、放電エネルギーから白色生成物の体積を算出し、白色生成物が気体である可能性が高いことを確認した。このことから、AC 電圧と雷 IMP とともに、沿面放電によって白色生成物が生成され、電力用変圧器の絶縁性能低下要因になりえることが分かった。

さらに、今回、白色生成物形成後の沿面放電進展速度を求めた。その結果、

大気中における沿面放電進展速度と一致し、油中における沿面放電進展速度  $10^3$  倍となることを新たに確認した。白色生成物形成後の  $t_d$  は、白色生成物形成前より小さく、平均の  $t_d$  は 36.0 %に減少した。このことから、雷 IMP 試験で沿面放電が発生した場合、波頭領域で瞬間的に放電が発生し、裁断波試験で破壊する可能性があるため、白色生成物の形成を抑制することが重要である。

最後に、図 2-17 に白色配線と、白色生成物形成前後の放電進展像の模式図を示す。図 2-17 (a) に示すように、白線生成物が形成される前に、高電圧電極から多数の放電が発生・進展する。その後、図 2-17 (b) に示すように、PB 表面上に、背面電極に沿って白色生成物が形成される。白線生成物は放電により発生したガスが微細な気泡として残ったものである。絶縁油はパラフィン系炭化水素、ナフテン系炭化水素、芳香族炭化水素に分類され、 $\text{CH}_3-(\text{CH})_n-\text{CH}_3$  に代表され、PB はセルロースであるため、 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$  に代表されることから、元素組成は C や H が多い。したがって、放電によって生成される白色生成物は、水素 ( $\text{H}_2$ )、メタン( $\text{CH}_4$ )、エタン( $\text{C}_2\text{H}_6$ )、エチレン( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、アセチレン( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、一酸化炭素 ( $\text{CO}$ )、二酸化炭素( $\text{CO}_2$ ) である可能性が高い。また図 2-17 (c) に示すように、白色生成物が形成された後、このガスに沿って放電が進行し、さらに電圧を上昇させると、図 2-17 (d) に示すように、白色生成物の外でも放電が発生・進展するようになる。

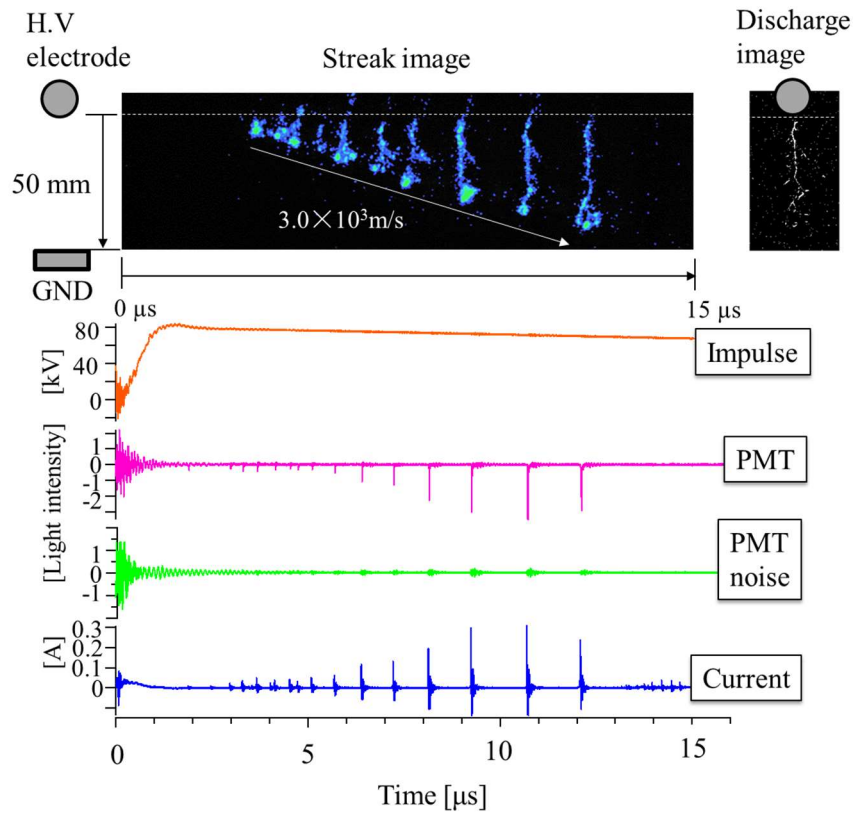


図2-8 白色生成物形成前におけるストリーク像（正極性80 kV 印加時）

表2-1 油中の沿面放電進展速度

| Oil         | Solid      | Polarity             | Velocity  |      |
|-------------|------------|----------------------|---|------|
| Mineral oil | Pressboard | Positive             | $2.5 \sim 50 \times 10^3 \text{ m/s}$                                   | [10] |
| Mineral oil | Hard glass | Positive<br>Negative | $1.4 \times 10^3 \text{ m/s}$<br>$0.7 \sim 0.9 \times 10^3 \text{ m/s}$ | [11] |
| Mineral oil | HDPE       | Positive<br>Negative | $2.57 \times 10^3 \text{ m/s}$<br>$2.67 \times 10^3 \text{ m/s}$        | [12] |
| Ester oil   | Pressboard | Positive             | $1.0 \sim 50 \times 10^3 \text{ m/s}$                                   | [13] |



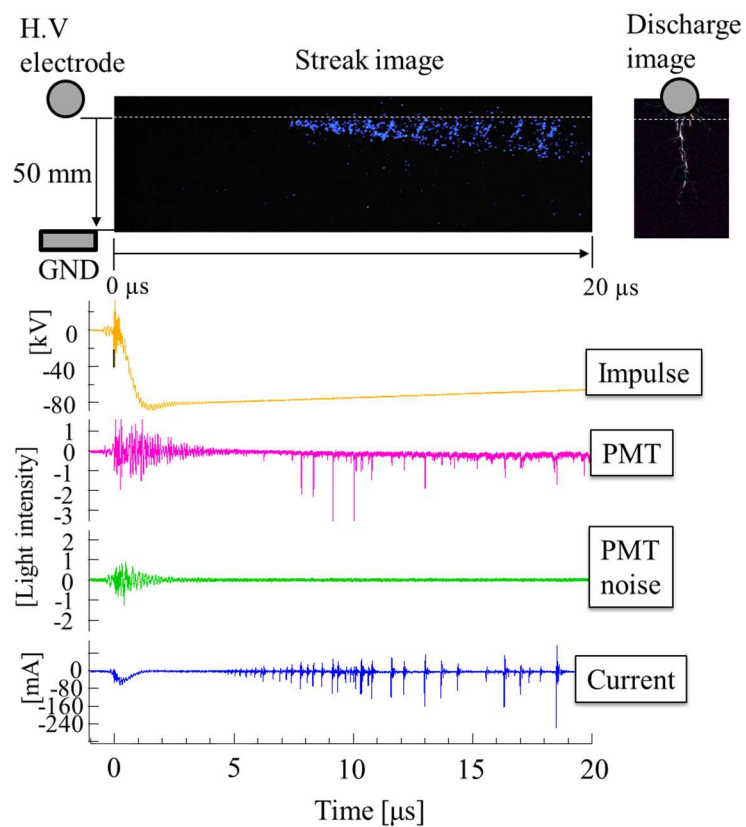


図2-9 白色生成物形成前におけるストリーク像（負極性80 kV 印加時）

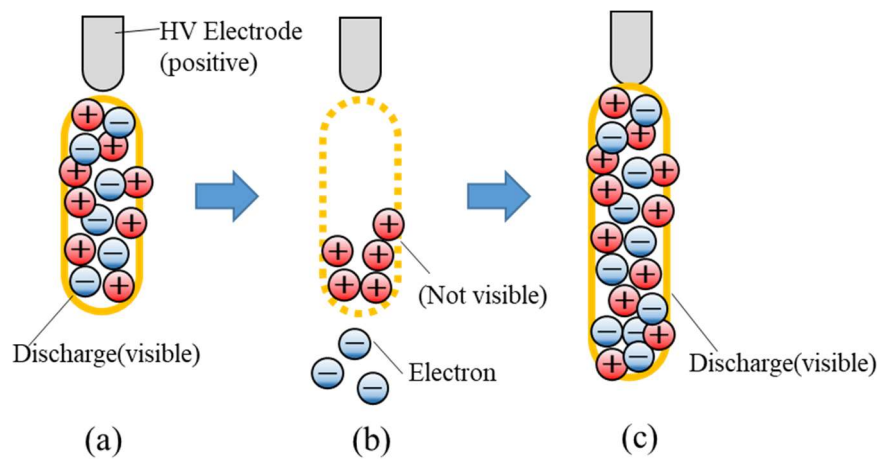


図2-10 沿面放電進展メカニズム

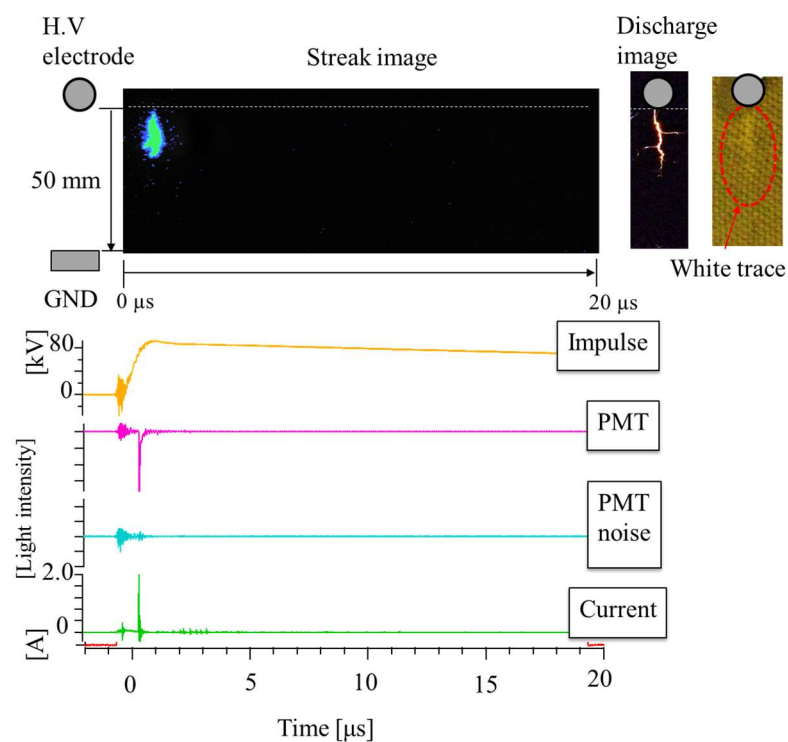


図2-11 白色生成物形成前におけるストリーク像（正極性80 kV 印加時）

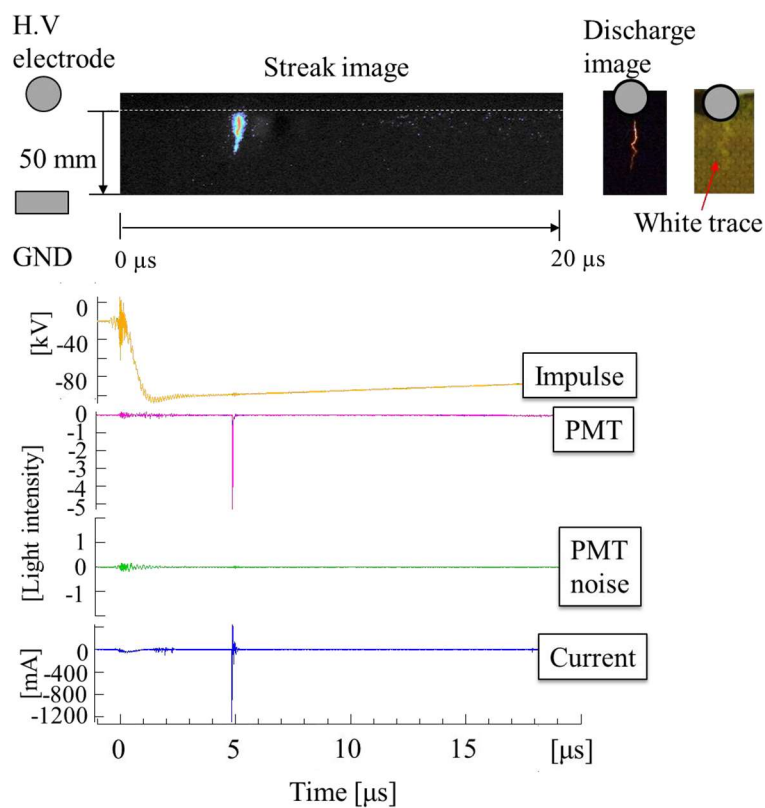


図2-12 白色生成物形成前におけるストリーク像（負極性80 kV 印加時）

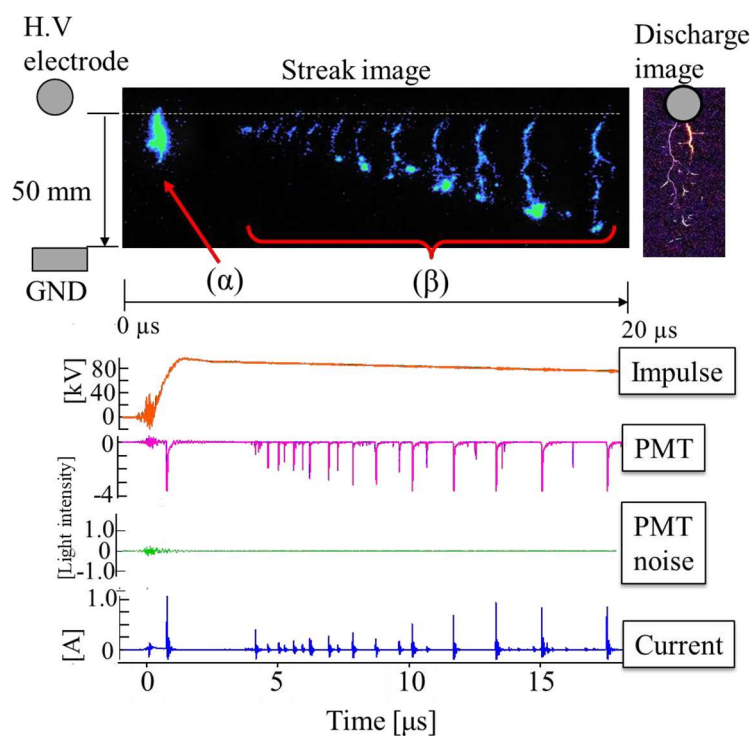


図2-13 白色生成物形成前におけるストリーク像（正極性100 kV 印加時）

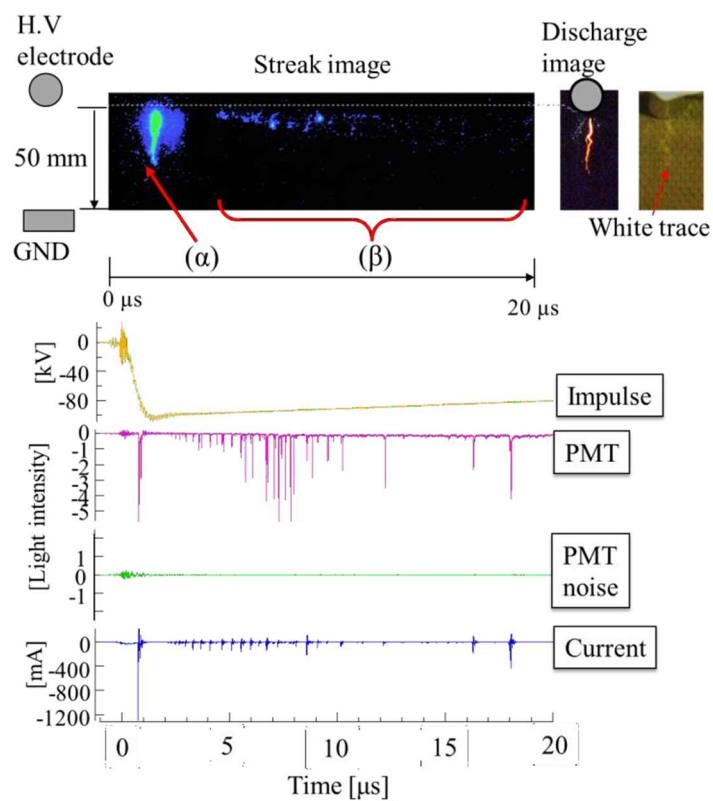


図2-14 白色生成物形成前におけるストリーク像（負極性100 kV 印加時）

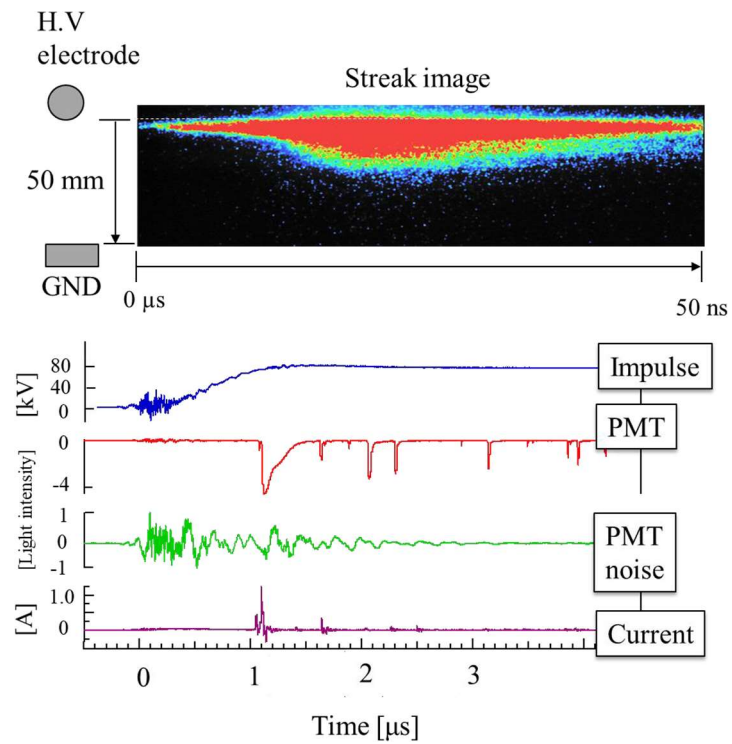


図2-15 図2-14(a)における白色生成物形成前におけるストリーク像（正極 100 kV 印加時）

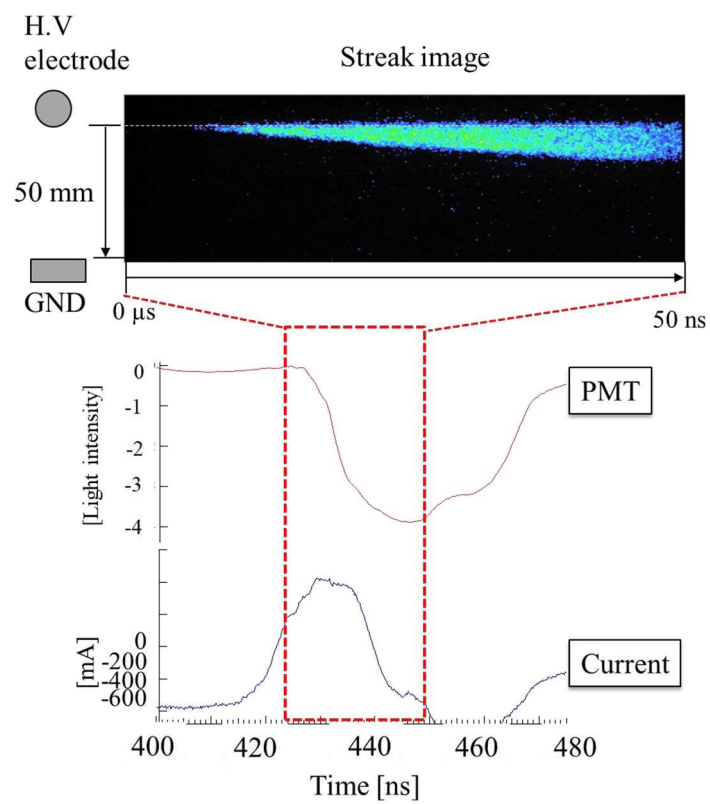
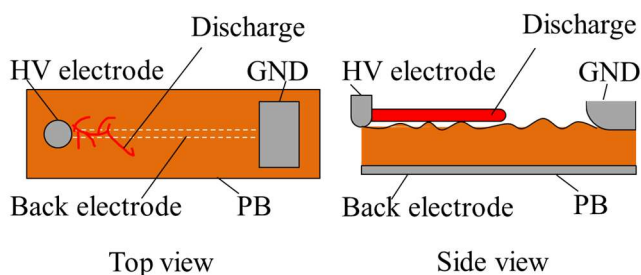


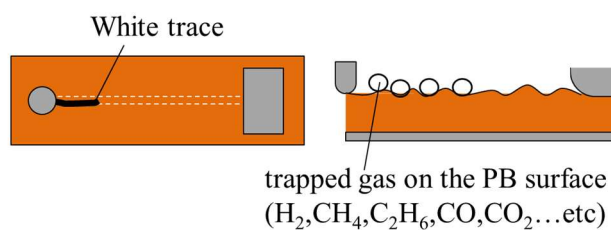
図2-16 図2-14 (b)における白色生成物形成前におけるストリーク像（負極 100 kV 印加時）

表2-2 ガス中の沿面放電進展速度

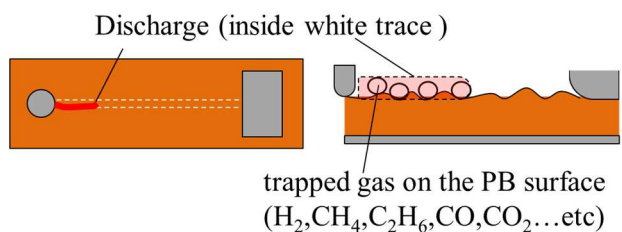
| Gas                                      | Solid | Polarity             | Velocity                                       |      |
|--|-------|----------------------|--|------|
| SF <sub>6</sub>                          | Epoxy | Positive             | $10^5 \sim 10^6$ m/s                           | [14] |
| Air                                      | Glass | Positive<br>Negative | $6.1 \times 10^6$ m/s<br>$2.6 \times 10^6$ m/s | [15] |
| SF <sub>6</sub> – N <sub>2</sub> mixture | -     | Positive             | $0.78 \sim 3.2 \times 10^6$ m/s                | [16] |



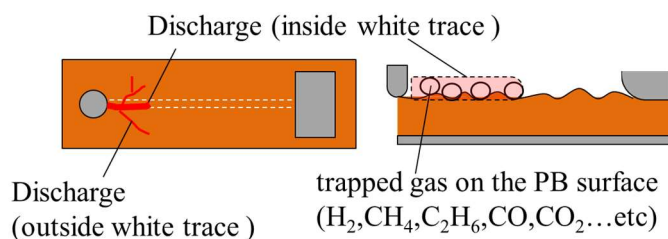
(a) Discharge image (before white trace formation)



(b) White trace



(c) Discharge image (after white trace formation with low voltage application)



(d) Discharge image (after white trace formation with high voltage application)

図2-17 沿面放電進展メカニズム

## 2. 3 まとめ

第2章では、『放電進展後に形成される白色生成物が放電進展速度・部分放電開始電圧に与える影響』について述べた。

本研究の着手当時には、油/プレスボード複合系において雷インパルス電圧を繰り返し印加すると、放電発生後に放電経路に沿って白色生成物が残り、絶縁上弱点になるという懸念があった。そこで本章では、その白色生成物の正体解明と放電特性への影響の把握を目的に、ストリークカメラ、光電子増倍管、および電流パルス検出を用いて雷インパルス電圧印加下における沿面放電進展速度、部分放電開始電圧を測定した。以下に得られた結果をまとめる。

- ① 白色生成物形成前と比較して、白色生成物形成後では、部分放電開始電圧が13 %低減することが判明した。
- ② また、白色生成物形成後は、放電パルス数も減少するが、電流のピーク値は増加することを確認した。
- ③ 放電進展速度は、白色生成物形成前は約  $3.0 \times 10^6$  m/s であり、油中の放電進展速度と一致した。一方、生成物形成後の進展速度は白色生成物形成前の約  $10^3$  倍になり、大気中の一般的な放電進展速度の順序と一致した。

白色生成物形成後の油中の圧力変化に伴う溶解度の変化を観測した結果により、白色生成物の正体が水分由来の気体で形成されていることを別実験から確認できており、このことが前述の実験結果を解釈できると考察した。すはなち、白色生成物は気体であるために、白色生成物形成後の放電進展速度が上昇したと判断した。また、油と比較して気体の放電発生電圧は低いために、部分放電開始電圧も低下したと判断した。

以上の結果より、沿面放電発生後に形成される白色生成物が絶縁上弱点になりえるため、実器の出荷時の課電試験において白色生成物の形成に注意を要することが判明した。今回得られた結果は、変圧器設計の際の有益な情報として活用予定である。

## 第2章の参考文献

- [1] Y. Nakao;H. Itoh;Y. Sakai;H. Tagashira, “Studies of the creepage discharge on the surface of liquids” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, No. 4, pp. 677-687, 1988.
- [2] Y. Nakao, M. Naruse, Y. Suzuki, H. Itoh, Y. Sakai, H. Tagashira, “Influence of Insulating Barrier on the Creepage Discharge in Transformer Oil” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol.4, No. 6, pp. 775-779, 1997.
- [3] M. Shinke, K. Miyazato, T. Tada, Y. Takeuchi, Y. Nakagami, R. Shimizu, M. Kosaka, and M. Wada, “Fundamental Studies on Development of Environment Friendly Vegetable Oil Filled Transformer”, IEEJ Trans. PE, vol. 123, No. 2, pp. 187-193, 2003. (in Japanese)
- [4] W. Liming, Z. Bo, M. Xiaobo, M. Hongwei, G. Zhiceng, Chen Changlong, “A Study on Streamer Discharge Characteristics along Contamination Insulator Surface , ” Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenom. (CEIDP), 2013
- [5] X. Yi, and Z. D. Wang, “Surface Tracking on Pressboard in Natural and Synthetic Transformer Liquids under AC Stress, ” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 20, No. 5, pp. 1625–1634, 2013.
- [6] T. Akahosi, K. Jang, M. Kozako, M. Hikita, S. Kainaga, S. Yoshida, T. Umemoto, M. Yoshimura, T. Tsurimoto, “Effect of White Discharge trace on Impulse Creeping Discharge Characteristics in Oil/Pressboard Composite Insulation System, ” IEEJ Trans. Fundamentals Materials (FM), vol. 137, No. 4, pp. 188–195, 2017. (in Japanese)
- [7] P. M. Mitchinson, P. L. Lewin, B. D. Strawbridge, and P. Jarman, "Tracking and surface discharge at the oil & pressboard interface, " IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 26, No. 2, pp. 35-41, 2010
- [8] J. Dai, Z. D. Wang, and P. Jarman, "Creepage Discharge on Insulation Barriers in Aged Power Transformers, " IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, pp. 1327-1335, 2010.
- [9] F. Murdiya, R. Hanaoka, H. Akiyama, and K. Miyagi, "Creeping Discharge Developing on Vegetable-based Oil/Pressboard Interface under AC Voltage, " IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, No. 5, pp. 2102 – 2110, 2014.
- [10] [10] H. Okubo, K. Okamura, M. Ikeda, S. Yanabu, " Creepage Flashover

- Characteristics of Oil/Pressboard Interfaces and Their Scale Effects, " IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol.2, No. 1, pp. 126 – 132, 1987.
- [11] Y. Nakao, H. Itoh, W. Oka, H. Yoshida, Y. Sakai, "Studies on Propagation of Insulation in Transformer Oil, " IEEJ Trans. Fundamentals Materials (FM), vol. 108, No. 8, pp. 313 – 320, 1988.(in Japanese)
- [12] R. Hanaoka, T. Kohrin, T. Miyagawa, T. Nishi, "Creepage Discharge Characteristics over Solid-Liquid Interfaces with Grounded Side Electrode, " IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 9, No. 2, pp. 313–320, 2002.
- [13] Q. Liu, Z. D. Wang, "Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids with pressboard interface under lightning impulse voltage, " IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 18, No. 6, pp. 1908–1917, 2011.
- [14] H. Hama, K. Inami, H. Fujii, T. Ooshi, M. Yoshimura, K. Nakanishi, "Leader Formation and Propagation of Positive Surface Discharge at Impulse Voltage in SF<sub>6</sub> Gas, " IEEJ Trans. Fundamentals Materials (FM), vol. 114, No. 5, pp. 397–406, 1994.(in Japanese)
- [15] Y. Murooka, T. Takada, K. Hidakata, "Nanoscale surface discharge and charge density evaluation Part I: review and experiments, " IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 17, No. 2, pp. 6–16, 2001.
- [16] T. Mizobuchi, H. Toyota, S. Matsuoka, A. Kumada, K. Hidaka "Nanoscale Electrical Discharge Development in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Gas Mixtures" IEEJ Trans. Fundamentals Materials (FM), vol. 125, No. 8, pp. 629-635, 2005.



## 第3章 放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明

### 3. 1. まえがき

国内で運用されている電力用油入変圧器は、高経年器が増加している。そのような中で新たに導入される電力用油入変圧器には、小型化とさらなる大容量化が求められる。一方、小型化・大容量化に伴って変圧器内部は高電界化する傾向にあるため、高電圧コイルの端部やコイル間の油隙等の電界集中箇所で発生する油中放電の基礎特性について、より一層の理解が必要となっている。

油-PB 複合絶縁系の放電現象は、放電の発生および進展の 2 段階に大別できる。これまで、電力用油入変圧器で一般的に用いられる絶縁油—プレスボード（以下 PB）複合絶縁系における雷インパルス電圧印加時の放電起点・進展特性を明らかにしてきた<sup>[1]</sup>。さらに最近では、数値解析を用いた放電現象の解明も行われている。例えば Lee らは、油中の PB 上に配置した針-棒電極にて、電荷連続の式、ポアソンの式を導入した数値解析シミュレーションを行い、電流密度や放電進展速度の計算結果の妥当性を実験結果との比較により示している<sup>[2,3]</sup>。また、Zahn らは、油中沿面放電の進展速度や電界強度に支配的となる因子は、ストリーマ中のイオン化であると数値解析シミュレーションと実験結果の比較により示している<sup>[4]</sup>。

一方、電力用油入変圧器においては、油隙の絶縁耐力向上を目的に、絶縁油の絶縁破壊電界 ( $E$ ) vs 油隙長 ( $d$ ) 特性や放電進展抑制効果を考慮して油隙が複数のバリア PB で分割される。そのため、電力用油入変圧器における油中放電メカニズムを解明しようとする、バリア PB による放電抑制効果についても検討することが重要である。

バリア PB による放電進展の抑制効果を解明するため、高圧電極と低圧電極間に L 字形のバリア PB を設置した電極系で検討を行い、その結果、沿面放電がバリア PB にまで進展した際に、バリア PB を貫通破壊することなく、バリア PB を介した油隙で放電が発生することを明らかにした<sup>[5]</sup>。また、その原因を、高圧電極から進展した放電によって第 2 油隙におけるバリア PB のくさびギャップ部の電界が強調され、バリア PB のくさびギャップの電界が放電発生電界に到達することで、第 2 油隙でも放電が発生したものと推定した<sup>[5]</sup>。

ただし、上記推定は、有限要素法を用いた電界解析ソフト (ElecNet) を用いた静電界解析によって行っており、放電の進展する現象や、それによる電界分

布の変化をシミュレーションで再現することはできず、上記推定の妥当性検証は未実施であった。

そこで本論文では、複数のバリア PB を用いた油-PB 複合絶縁系において沿面放電シミュレーションを実施し、これまでに取得した実験結果と比較することで、上記推定の妥当性を検証し、絶縁油中の沿面放電メカニズムの解明を目的に検討した結果を述べる。

### 3. 2 シミュレーションモデル

有限要素法を用いた汎用マルチフィジックスシミュレーションソフト「COMSOL Multiphysics」を用いた 2D 解析によって、油-PB 複合絶縁系における沿面放電シミュレーションを行った。

#### 3. 2. 1 鉱油中の適用式

ポアソンの式・電荷連続の式・熱拡散方程式を連立することにより、ストリーマ放電進展を再現した。式(3-1)はポアソンの式を表している。式(3-2)から(3-4)は、ポジティブイオン( $\rho_+$ )、ネガティブイオン( $\rho_-$ )、電子( $\rho_e$ )の一般的な電荷連続の式をそれぞれ表している。式(3-5)は、熱拡散方程式を表しており、ストリーマ進展時における温度を計算する際に使用した。

【ポアソンの式】

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla V) = \rho_+ + \rho_- + \rho_e \quad (3-1)$$

【電荷連続の式】

$$\frac{\partial \rho_+}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_+ \mu_+ \vec{E}) =$$

$$\frac{\partial \rho_-}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_- \mu_- \vec{E}) = -G_D(|\vec{E}|, T) - \frac{\rho_+ \rho_- R_{+-}}{q} + \frac{\rho_e}{\tau_a} \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \mu_e \vec{E}) = -G_I(|\vec{E}|) - \frac{\rho_+ \rho_- R_{+-}}{q} - \frac{\rho_e}{\tau_a} \quad (3-3)$$

【熱拡散方程式】

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho_l c_v} (k_T \nabla^2 T + \vec{E} \cdot \vec{j}) \quad (3-4)$$

ここで、 $\rho_+$ 、 $\rho_-$ 、 $\rho_e$ は正イオン、負イオン、電子の電荷密度、 $R_{+e}$ 、 $R_{+-}$ は正イオン-電子間、正イオン-負イオン間の再結合係数、 $\tau_a$ は電子付着係数、 $\varepsilon$ は誘電体の誘電率、 $V$ は電位、 $e$ は素電荷量、 $t$ は時刻、 $k_T$ は熱拡散係数、 $\rho_l$ は密度、 $c_v$ は比熱を表している。添え字+、-、eはそれぞれ正イオン、負イオン、電子に関する物理量であることを示している。放電に関わる荷電粒子として、正イオン、負イオン、電子を考慮した。式(3-6)に示す正イオン-電子間での生成・消滅項である $G_I(|\vec{E}|)$ は、絶縁油中で起こる衝突過程や反応過程に依存する

項であり，分子の電子による衝突電離を考慮するために計算に使用した。

$$G_I(|\vec{E}|) = \frac{en_0 a \vec{E}}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m a \Delta^2}{eh^2 |\vec{E}|}\right) \quad (3-5)$$

ここで， $E$ は電界， $n_0$ は分子数， $a$ は分子間距離， $m$ は有効質量， $h$ はプランク定数， $\Delta$ は電離エネルギーであり，式(3-7)に示す正イオン - 負イオンでの生成・消滅項である $G_D(|\vec{E}|)$ は，絶縁油中で起こる分子のイオンへの分解を考慮するために計算に使用した。式(3-8)は，式(3-7)中の $b$ を算出するために使用した。

$$G_D(|\vec{E}|, T) = \frac{a^2}{\varepsilon_e(\mu_+ \mu_-)} \times \frac{l_{(x)}(4b)}{2b} \quad (3-7)$$

$$b = \sqrt{\frac{e^3 |\vec{E}|}{16\pi \varepsilon k^2 T^2}} \quad (3-8)$$

ここで， $\mu_+$ ， $\mu_-$ は正イオンと負イオンの移動度， $k$ はボルツマン定数， $T$ は温度， $I_1(x)$ は第一種変形ベッセル関数である。正イオン－電子間の再結合係数 $R_{+e}$ は式(3-9)，正イオン－負イオン間の再結合係数 $R_{+-}$ は式(3-10)のように表される。また，参照した絶縁油中のパラメータの値と文献を表3-1にまとめた。

$$R_{+e} = \frac{q(\mu_+ + \mu_-)}{\varepsilon} \quad (3-9)$$

$$R_{+-} = \frac{q(\mu_+ + \mu_-)}{\varepsilon} \quad (3-10)$$

表 3-1. シミュレーションで使用したパラメータ

| パラメータ                           | 記号                  | 値  |
|---------------------------------|---------------------|--|
| 鉱油の比誘電率                         | $\varepsilon_{oil}$ | 2.2  |
| PBの比誘電率                         | $\varepsilon_{PB}$  | 4.2  |
| 正イオンの移動度 <sup>[6, 7]</sup>      | $\mu_+$             | $5 \times 10^{-9}$<br>[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup> ]    |
| 負イオンの移動度 <sup>[6, 7]</sup>      | $\mu_-$             | $5 \times 10^{-9}$<br>[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup> ]    |
| 正イオン－電子間の再結合係数 <sup>[8]</sup>   | $R_{+e}$            | $9.908 \times 10^6$<br>[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ] |
| 正イオン－負イオン間の再結合係数 <sup>[9]</sup> | $R_{+-}$            | $9.908 \times 10^6$<br>[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ] |

### 3. 2. 2 電極表面の適用式

高電界による電極表面からの電子放出は、一般的にファウラー・ノルドハイムの式で表される。これは、トンネル効果によって電極と鉱油との間の障壁層を電子が通過する現象を示している。今回の沿面放電シミュレーションの際にも、電極表面からの電子放出を考慮するために、式(3-11)で表されるファウラー・ノルドハイムを計算に使用した。さらに、電極表面からの熱電子放出を考慮するために、リチャードソン・ダッシュマンの式(3-12)も計算に使用した。図3-1に、上記電子放出（式(3-11), (3-12)）の概念図を示す。ここで、 $h$ はプランク定数、 $\phi$ は仕事関数、 $\phi_D$ は金属の誘電体に対する実効仕事関数であり、4.33 eVを使用した。また、 $A$ は $1.2 \times 10^6 \text{ A/(m}^2\text{K}^2)$ を使用した。誘電体（PB）は導電率ゼロの理想的な固体誘電体とした。電界によってギャップ間の電子や正負イオンが加速され誘電体（PB）に衝突した場合、誘電体表面に面状電荷として帯電すると仮定して計算した。

【ファウラー・ノルドハイムの式】

$$J_{FE} = \frac{e^3 |\vec{E}|^2}{8\pi h \phi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m}\phi^{\frac{3}{2}}}{3he|\vec{E}|}\right) \quad (3-11)$$

【リチャードソン・ダッシュマンの式】

$$J_{TH} = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi_D}{kT}\right) \quad (3-12)$$

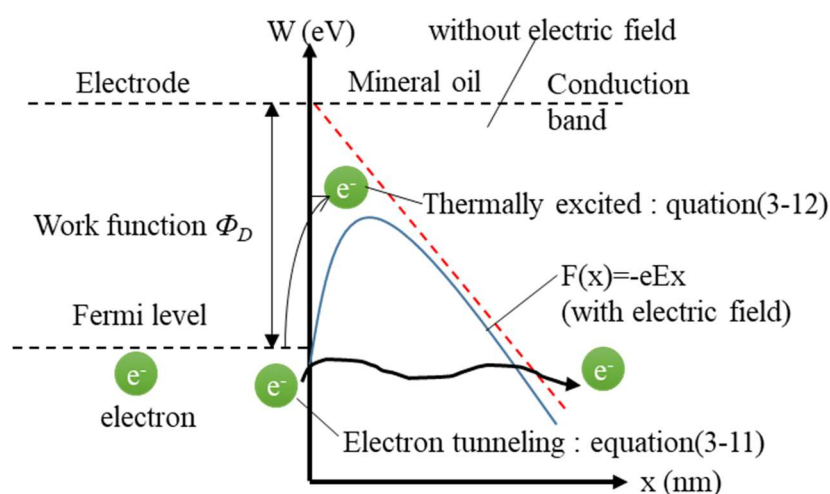


図3-1 電子放出（式(3-11), (3-12)）の概念図

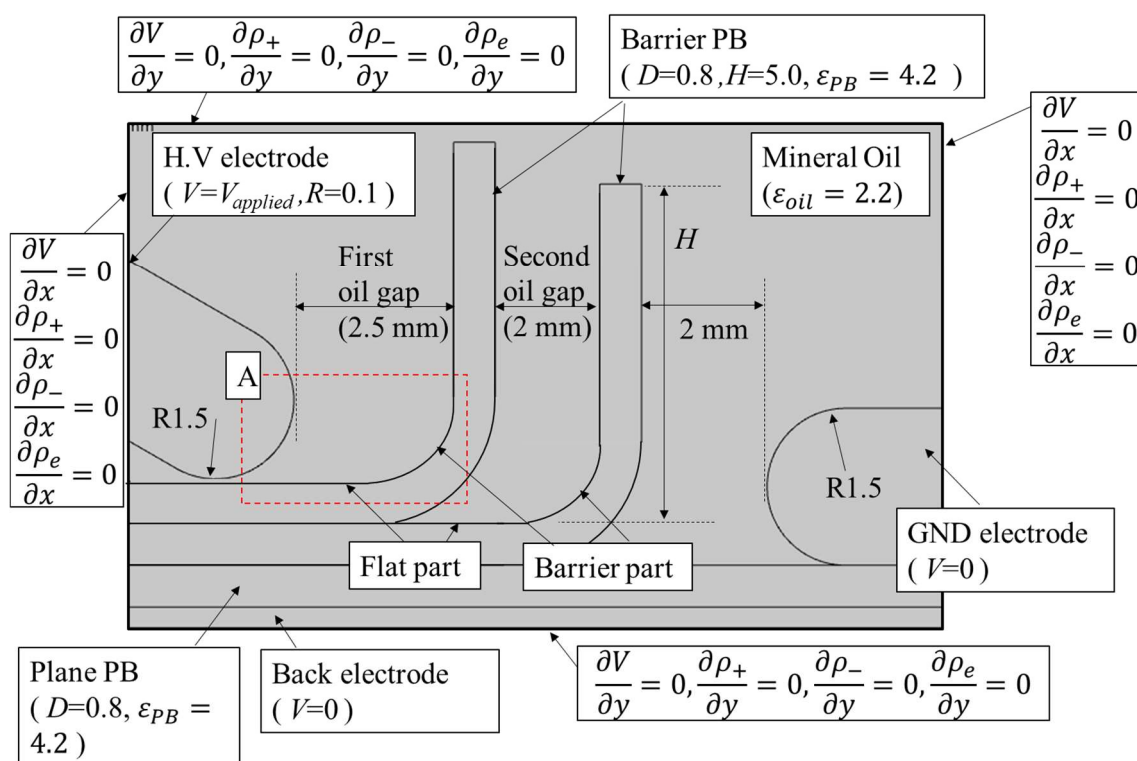
### 3. 2. 3 解析と実験で使用したモデル

#### (ア) 沿面放電抑制モデル

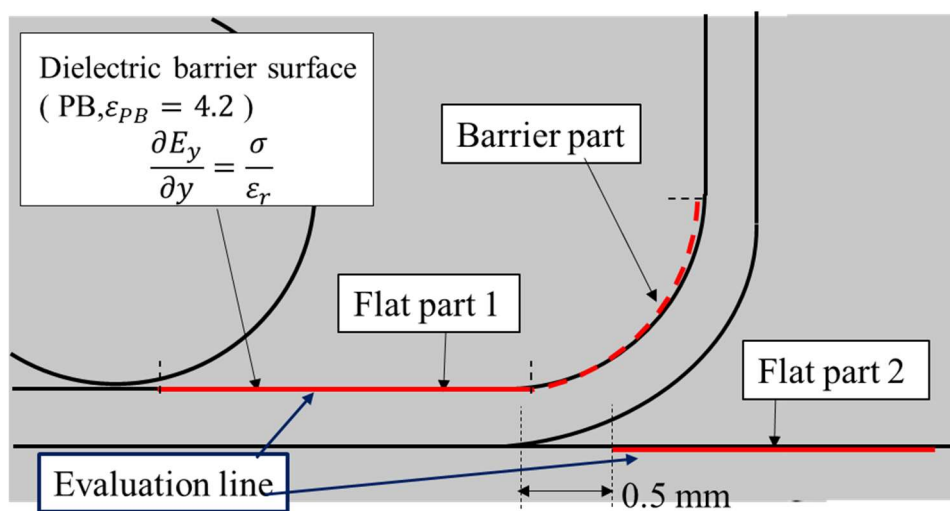
図 3-2 に、解析で使用したモデルを示す。高圧電極と低圧電極には、ステンレス製の先端径 1.5 mm の棒電極を使用した。高圧電極と低圧電極との距離は 8.1 mm とした。高圧電極に標準(1.2 / 50  $\mu$ s)雷インパルス電圧 300 kV を印加した。高圧・低圧電極の下部に、背後電極を配置し、高圧・低圧電極と背後電極との間には、厚み  $D=0.8$  mm の平板 PB と L 字形をしたバリア PB を配置した。バリア PB の高さ  $H$  は 5 mm とし、高圧電極と低圧電極との間の油隙をバリア PB で分割した。今回は、それぞれの油隙を高圧電極から近い側から第 1 油隙、第 2 油隙とそれぞれ呼ぶことにする。

図 3-3 に、実験で使用した電極を示す。シミュレーションで用いたモデルと同様の電極構成となっている。電極は、鉱油で満たされたタンク内に配置し、標準雷インパルス電圧を昇圧法により印加した。ここで、初期電圧は 10 kV とし、昇圧間隔は 1 分間、ステップ幅は 10 kV とした。

図 3-4 に 180 kV、図 3-5 に 210 kV を印加した際の放電発光像の代表例を示す。放電発光像は、デジタルカメラ(FUJIFILM FINEPIX 100)を使用して取得した。図 3-4 より、180kV 印加時には、第 1 油隙にて放電が PB 表面を進展し、バリア PB によって進展が抑制されていることがわかる。一方、図 3-5 より、210 kV 印加時には、バリア PB の貫通や飛び越えなく、第 2 油隙でも放電が PB 表面を進展している様子が確認できる。この現象については、これまで同様の電極系を用いた実験においても確認してきた<sup>[5]</sup>。また、その原因を、高圧電極から進展した放電によって第 2 油隙におけるバリア PB のくさびギャップ部の電界が強調され、バリア PB のくさびギャップの電界が放電発生電界に到達することで、第 2 油隙でも放電が発生したものと解釈した。3.3.では、上記推定がシミュレーションによって説明可能であるか検討を行う。



(a) 解析モデルの全体像



(b) 図3-2(a)における破線Aの拡大図

図3-2 解析で使用了モデル (沿面放電抑制モデル)

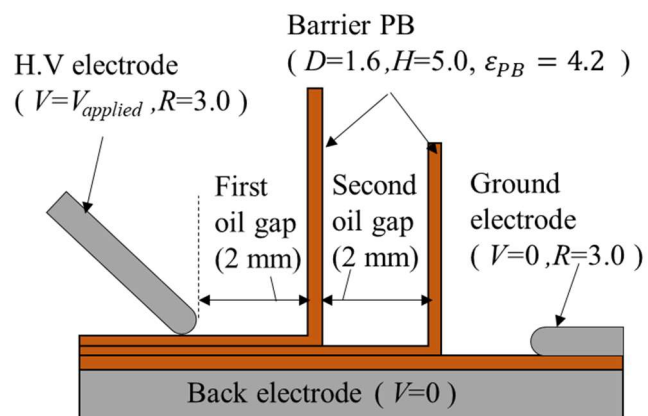
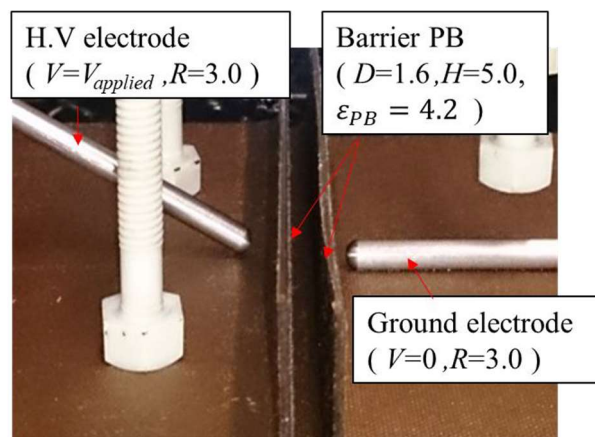


図3-3 電極系（沿面放電抑制モデル）

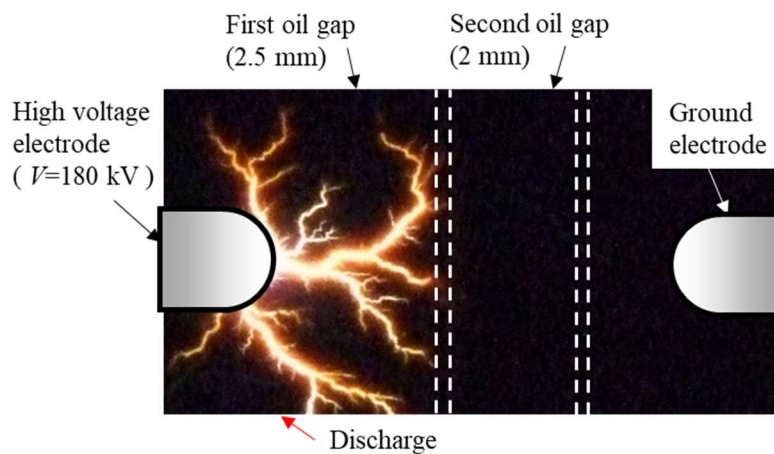


図3-4 放電発光像の代表例（180 kV，沿面放電抑制モデル）



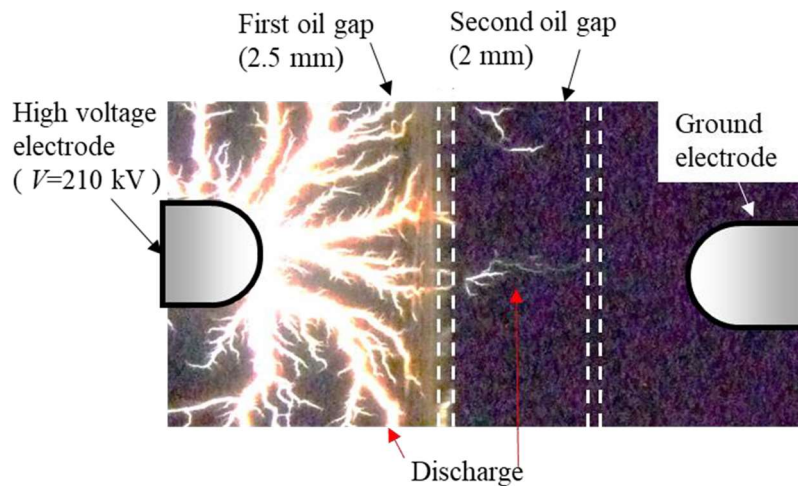


図3-5 放電発光像の代表例（210 kV，沿面放電抑制モデル）

#### （イ）バリア直列モデル

図 3-6 に解析で使用したモデルを示す。また，図 3-7 に実験で使用した電極系を示す。高圧電極には，ステンレス製の先端径 3.0 mm の棒電極を使用した。また，低圧電極には，直径 70.0 mm の平板電極を使用した。高圧電極と低圧電極との間の油隙は， $140 \times 140 \text{ mm}^2$ ，1.6 mm のバリア PB で分割し，高圧電極側の油隙を第一油隙，低圧電極側の油隙を第二油隙とそれぞれ呼ぶ。

図 3-8 に放電発光像の代表例を示す。図 3-8 (a) は第 1 油隙で放電が発生した際の様相であり，図 3-8 (b) は第 2 油隙で放電が発生した際の様相である。また，図 3-9 に，部分放電開始電圧の比較結果を示す。図 3-8 および図 3-9 に示すとおり，正極性の場合，第 1 油隙で 170 kV 印加時に放電が発生し，その後 205 kV 印加時に放電が発生した。一方，負極性の場合，215 kV 印加時に第 1 油隙で放電が発生し，220 kV 印加時に第 2 油隙で同時に放電が観測された。直列バリアモデルにおいても，沿面放電抑制モデルと同様に，バリア PB の貫通や飛び越えなく，第 2 油隙でも放電が PB 表面を進展している様子が確認できた。また，その原因を，高圧電極から進展した放電によって，バリア PB 表面下に平等電界が形成され，第 2 油隙におけるバリア PB 表面下の電界が強調され，その電界が放電発生電界に到達することで，第 2 油隙でも放電が発生したものと推定した[5]。3.3.では，前節で記載した沿面放電抑制モデルと合わせて，上記推定がシミュレーションによって説明可能であるか検討を行った。

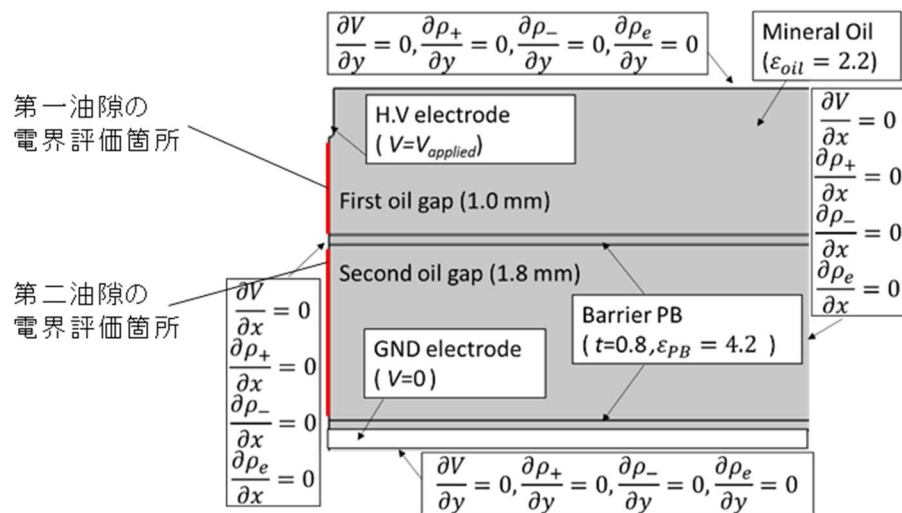


図3-6 解析で使したモデル（直列バリアモデル）

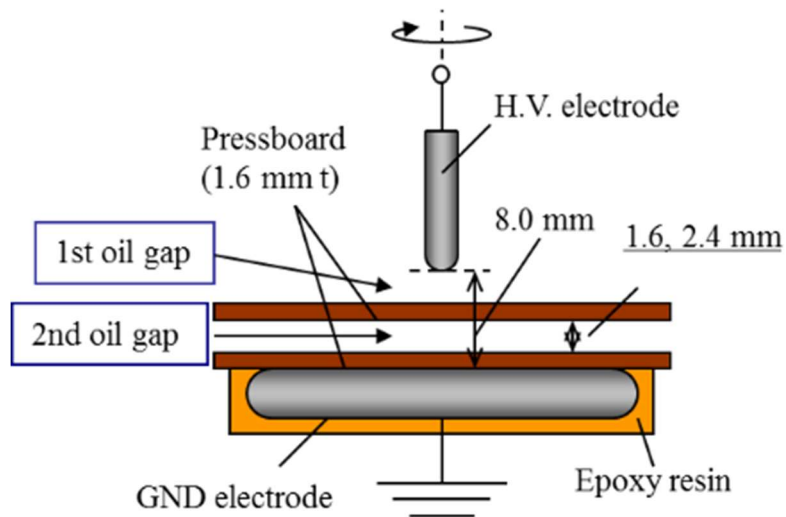
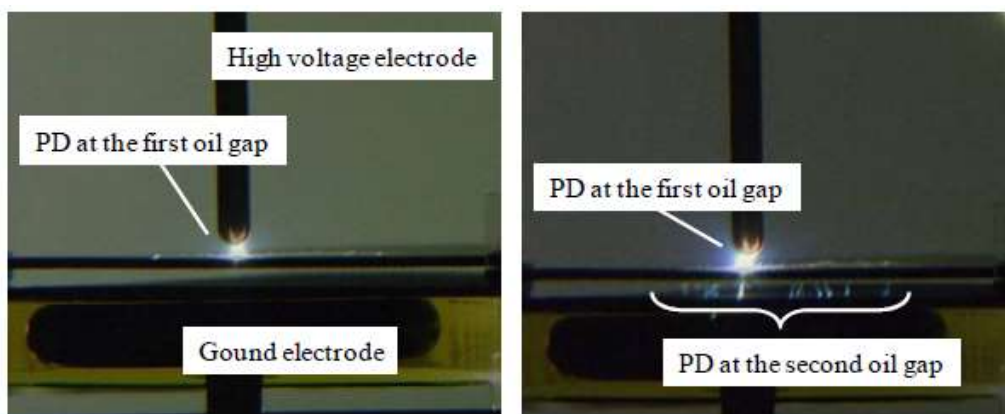


図3-7 電極系（直列バリアモデル）



(a)第一油隙での放電 (b)第二油隙での放電

図3-8 放電発光像の代表例（直列バリアモデル）

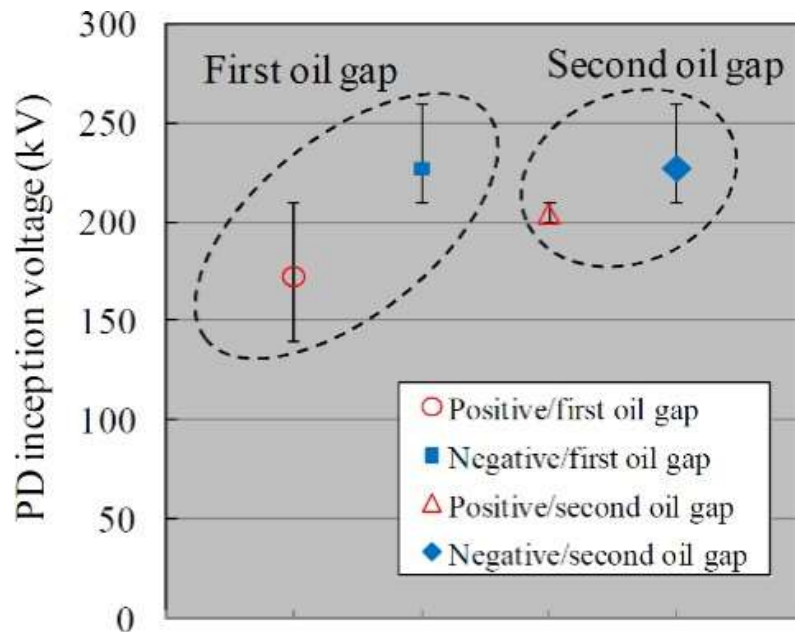


図3-9 部分放電開始電圧の比較

### 3. 3 シミュレーション結果

#### 3. 3. 1 電界分布

図 3-10 および図 3-11 に、シミュレーションによって得られた電界分布を示す。図 3-10 は沿面放電抑制モデルであり、印加電圧  $V_a=300$  kV とした。図3-11 は直列バリアモデルであり、これも印加電圧を  $V_a=300$  kV とした。

図 3-10 に示す通り、 $t = 100$  ns において、高圧電極近傍より放電が発生・進展していることがわかる。また、 $t = 100 \sim 150$  ns において、放電が鉱油とPB の境界に沿って低圧電極に向かって進展している様子が確認できる。ここで、放電先端の電界強度は  $5 \sim 7 \times 10^2$  [kV/mm] であった。放電がバリアPB に到達した後は、 $t = 400$  ns において、バリア PB のくさびギャップ部における電界が強調されている様子が確認できる。また、 $t = 460$  ns において、図3-5 (b)で観測されたように、第 2 油隙での放電が、シミュレーション上でも発生している様子が確認できた。

また、図 3-11 に示すとおり、 $t = 200$  ns において高圧電極近傍より放電が発生・進展していることがわかる。また、 $t = 400$  ns において、バリア PB まで放電が進展した後、第 2 油隙でも放電が発生している様子が確認できた。

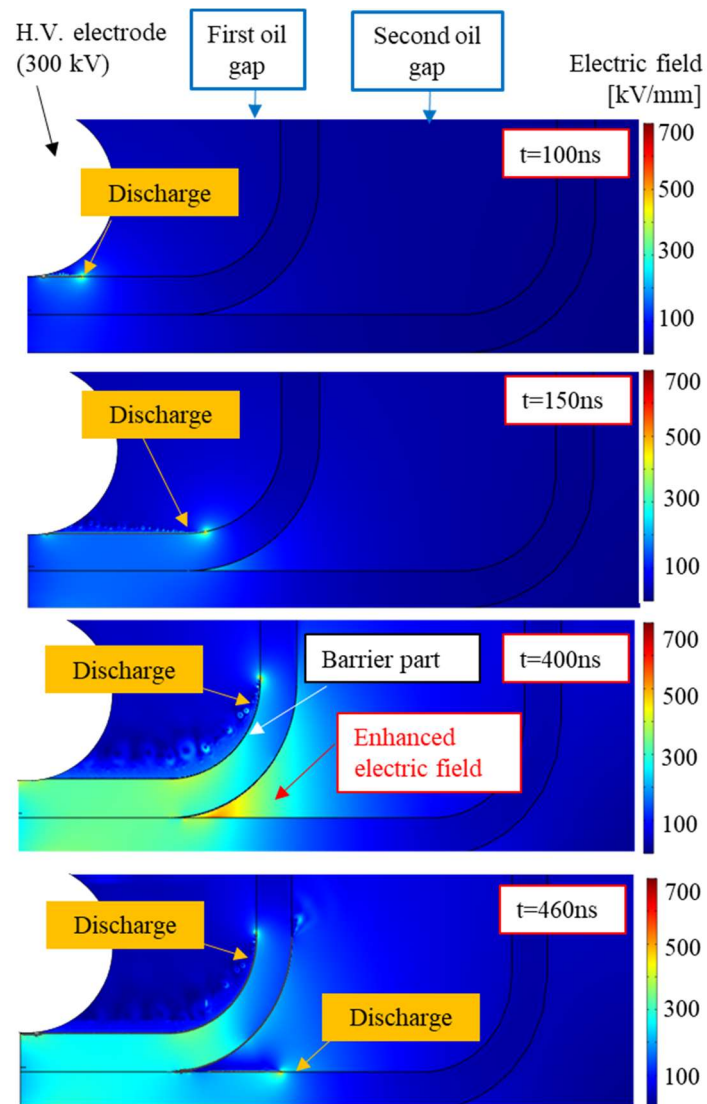


図3-10 シミュレーションによって得られた電界分布（沿面放電抑制モデル）  
@ $V_a=300\text{ kV}$

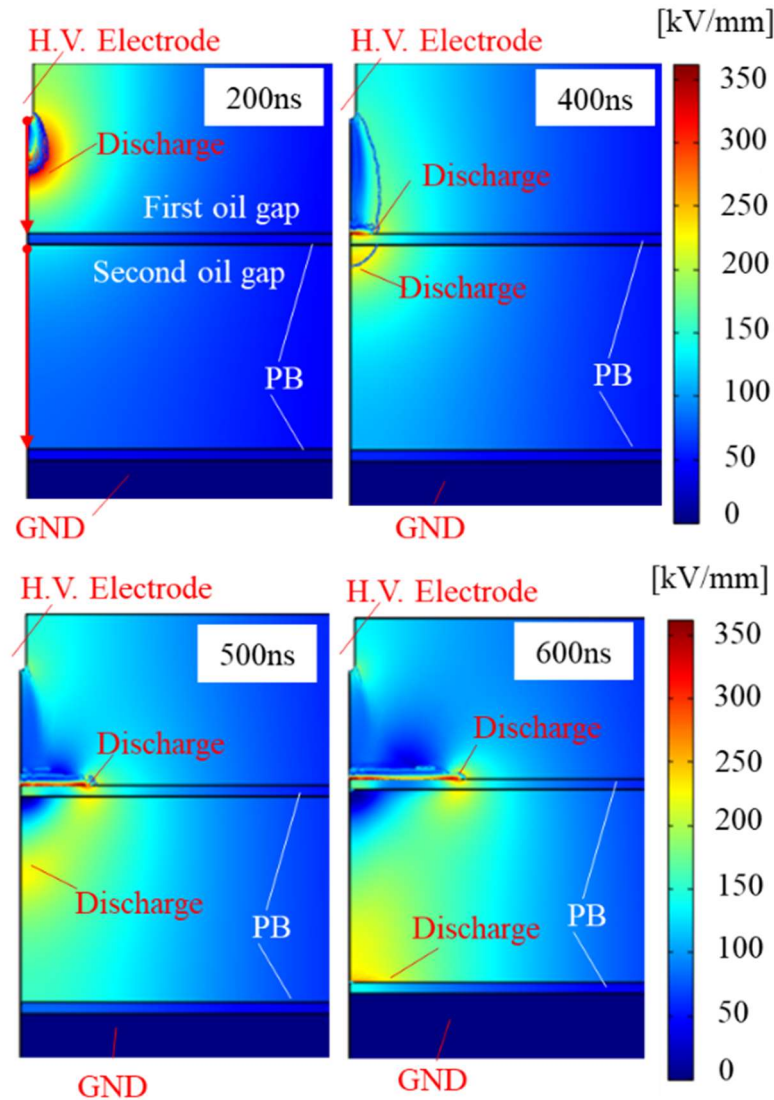


図3-11 シミュレーションによって得られた電界分布（バリア直列モデル）  
@ $V_a=300$  kV

### 3. 3. 2 第1油隙における沿面放電シミュレーション

図 3-12～図 3-14 に、沿面放電進展抑制モデル（図 3-2 (b)）の第1油隙部の電界・温度の評価箇所における電界強度や電位，温度分布を示す。図 3-12 に電界強度を示す。第1油隙を放電が進展した場合， $t = 100 \sim 150$  ns において，電界のピークが放電先端部に表れていることがわかる。一方，放電がバリア PB に到達した後，すなわち  $t = 400 \sim 460$  ns においては，電界のピークは放電先端ではなく，全体的にほぼ一定の値になっていることがわかる。また，同図(a)より，放電の放電進展速度は， $1 \sim 4 \times 10^4$  [m/s]と算出することができる。これは他機関の報告<sup>[8]</sup>とほぼ同一の結果である。

図 3-13 は放電の電位を示している。図 3-13 より、放電先端から電圧降下は生じており、10～50 kV 低下していることがわかる。これについても他機関の報告<sup>[9]</sup>とほぼ同一の結果であった。

図 3-14 は温度分布を示している。図 3-14より、第 1 油隙を放電が進展した場合、 $t = 100 \sim 150 \text{ ns}$  において、温度のピークが放電先端部に表れていることがわかる。この傾向は、図 3-12で示した電界強度と傾向が一致していることがわかる。これは、電界によってイオン化した自由電荷がジュール加熱に寄与し、温度が上昇することを意味している。また、温度は  $t = 400 \text{ ns}$  で上昇しており、バリア部で放電が停止している間、加熱が継続することがわかった。

また、図 3-15 に直列バリアモデルの第 1 油隙の電界評価箇所における電界強度を示す。第 1 油隙を放電が進展した場合、 $t = 100 \sim 300 \text{ ns}$  において、電界のピークが放電先端部に表れていることがわかる。一方、放電がバリアPBに到達した後、すなわち  $t = 500 \text{ ns}$  においては、電界のピークは放電先端ではなくなり、全体的にほぼ一定の値になっていることがわかる。また、放電の放電進展速度は、 $1 \sim 4 \times 10^4 \text{ [m/s]}$ と算出することができ、これも他機関の報告<sup>[8]</sup>とほぼ同一の結果を得ることができた。

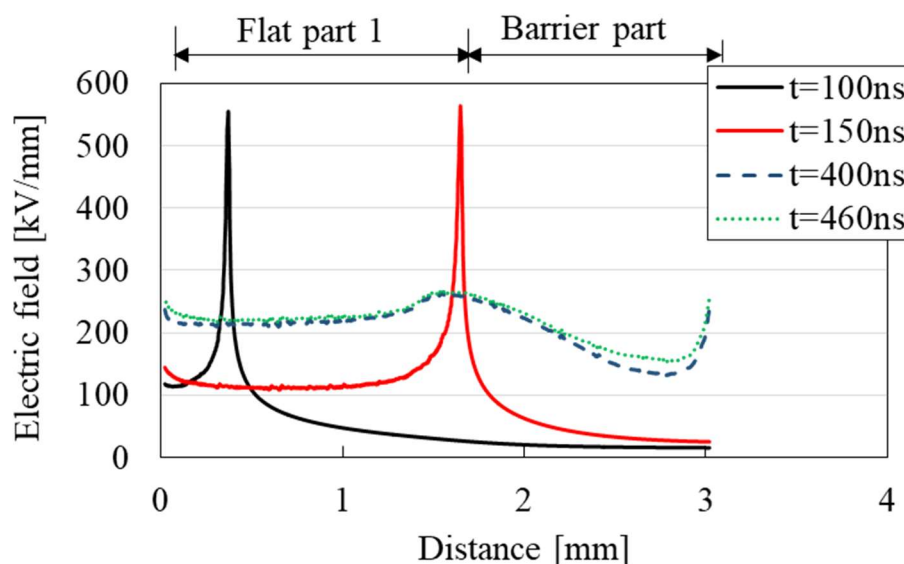


図3-12 第1 油隙部の電界・温度の評価箇所における電界強度  
(沿面放電抑制モデル) @ $V_a=300 \text{ kV}$



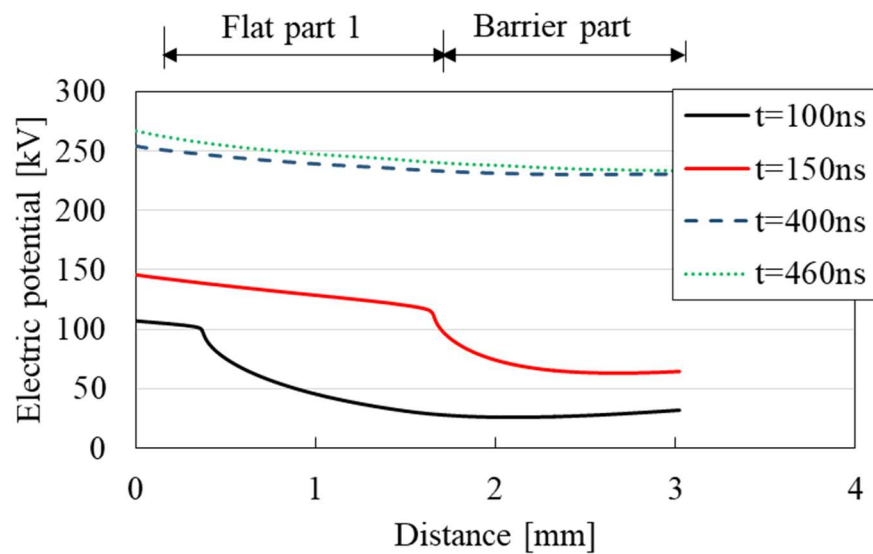


図3-13 第1 油隙部の電界・温度の評価箇所における電位  
(沿面放電抑制モデル) @ $V_a=300$  kV

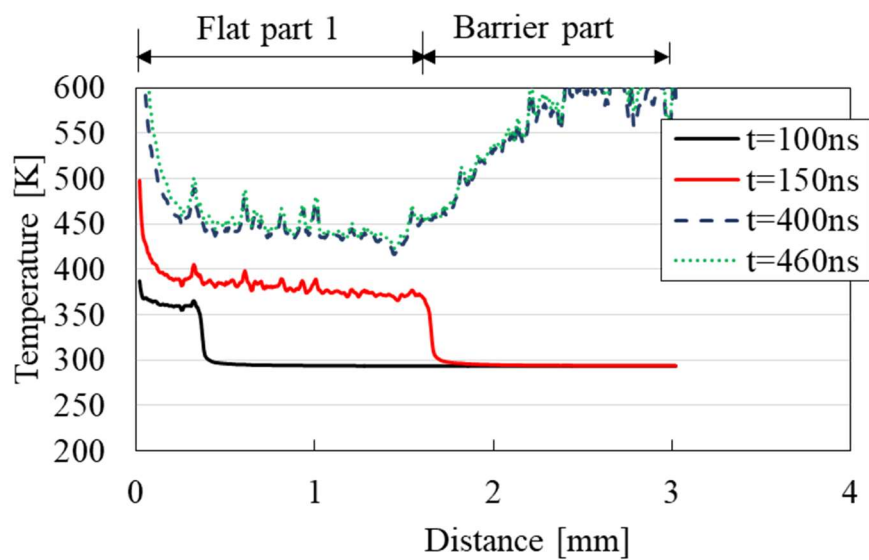


図3-14 第1 油隙部の電界・温度の評価箇所における温度分布  
(沿面放電進展抑制モデル) @ $V_a=300$  kV

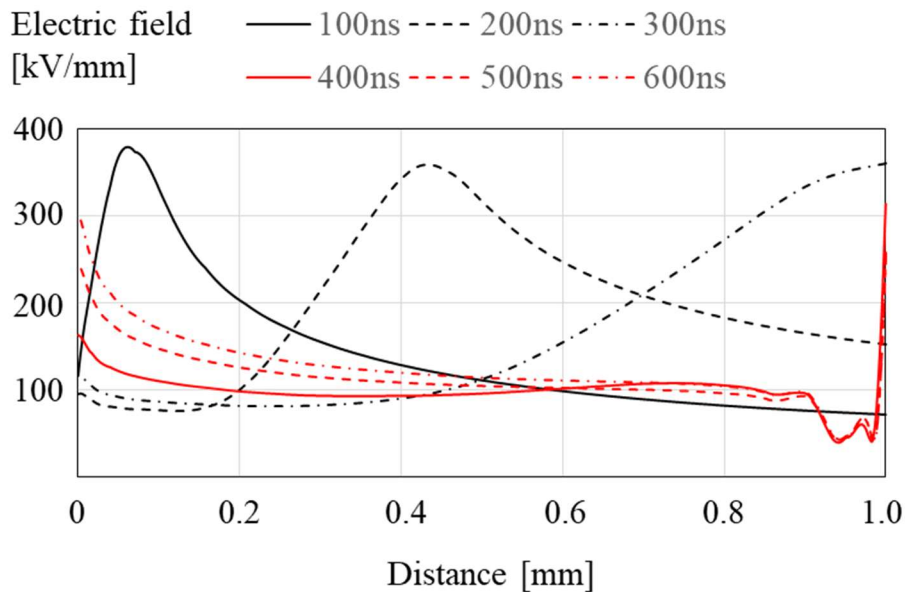


図3-15 第1油隙部の電界・温度の評価箇所における電界強度  
(直列バリアモデル) @ $V_a=300$  kV

### 3. 3. 3 第2油隙における沿面放電シミュレーション

図3-16～図3-18に、沿面放電抑制モデルの第2油隙部の評価部における電界強度や電位、温度分布を示す。図3-16に電界強度を示す。第1油隙を放電が進展し、バリアPBで放電進展が抑制された後の $t=400$  nsにおいて、第2油隙において放電が発生し初めることが分かる。また、放電先端に電界のピークが形成されており、 $2\sim6\times10^4$  [m/s]であり、これは3.2で示した第1油隙での値とほぼ同等である。さらに、第2油隙を進展する放電の電圧降下や温度上昇についても、第1油隙と第2油隙で傾向が一致していることを確認した。

図3-17より、第1油隙を放電が進展し、バリアPBに到達した際、放電の電位が電極の電位とほぼ同じレベル(=300 kV)まで上昇していることがわかる。また、図3-16より、くさびギャップの電界が上昇した後、第2油隙で放電が発生・進展している様子がシミュレーション上で確認できる。

また、図3-19に直列バリアモデルの第2油隙部の評価部における電界強度を示す。第1油隙を放電が進展し、バリアPBで放電進展が抑制された後の $t=400$  nsにおいて、第2油隙において放電が発生し初めることが分かる。また、沿面放電抑制モデルと同様に、放電先端に電界のピークが形成されており、 $2\sim6\times10^4$  [m/s]であり、これは3.2で示した第1油隙での値とほぼ同等であった。



以上より、今回、バリア PB を貫通破壊することなく、バリア PB を介した油隙で放電が発生する現象を、シミュレーションによって説明を試みた。その結果、高圧電極から進展した放電によって第 2 油隙におけるバリア PB のくさびギャップ部の電界が強調され、それによって第 2 油隙でも放電が発生していることを示すことができた。これにより、シミュレーションによって、現象の物理メカニズム解明に近づいたと考える。

しかしながら、図 3-5に示すように実験では 210 kV で第 2 油隙にて放電が発生し始めたのに対し、シミュレーションでは、図 3-11に示すように 300 kV で第 2 油隙にて放電が発生し始め、実験とシミュレーションで差が生じた。この違いについては、以下 1) 2) が原因として考えられるため、これらを含めた詳細検討は、今後の検討課題とする。

今回、電極からの初期電子放出をトンネル効果によって考慮した。一方、電極表面の多数突起による電界増倍係数 $\beta$ は今回考慮しなかった。一般的に $\beta$ は  $10 \leq \beta \leq 150$  と知られているため<sup>[10]</sup>、ファウラーノルドの式に $\beta$ を含めることで放電発生電圧は低下すると考える。

沿面放電により PB 中に発生したガスが微小な気泡として残留することが知られている<sup>[11,12]</sup>。一方、今回のシミュレーションではその点について考慮しなかった。油中にガスが存在することで、放電発生電圧は低下すると考える。

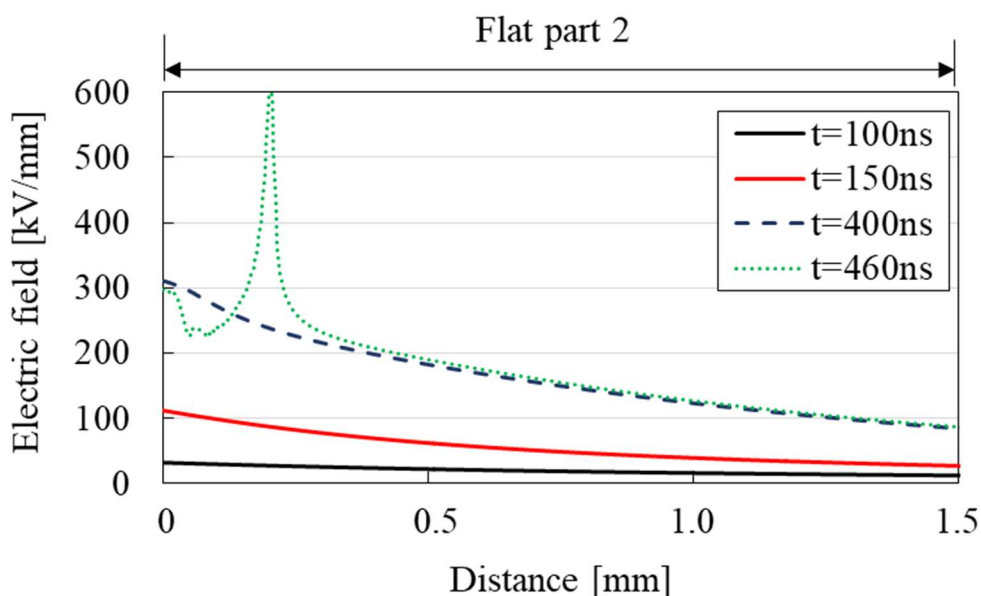


図3-16 第2 油隙部の評価部における電界強度  
(沿面放電抑制バリアモデル) @ $V_a=300$  kV

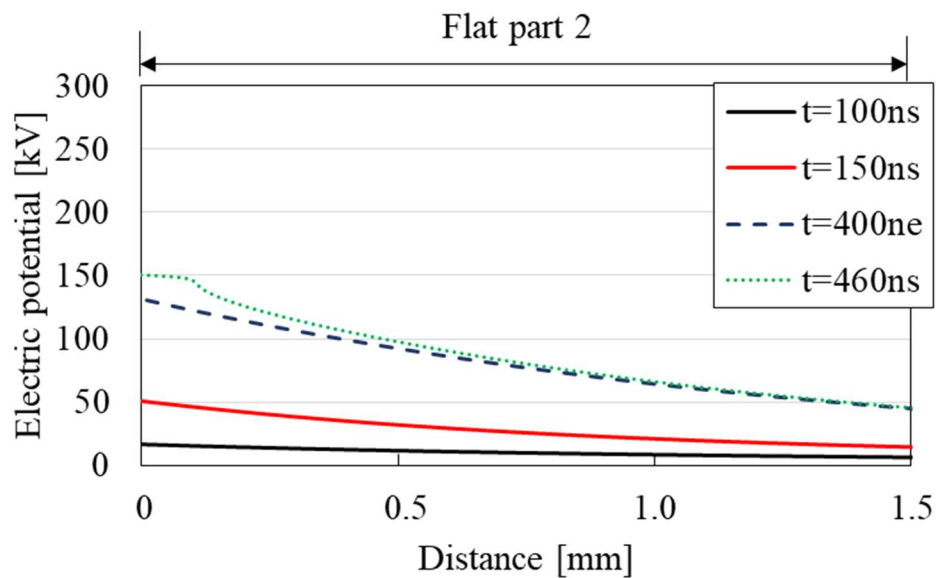


図3-17 第2 油隙部の評価部における電位  
(沿面放電抑制バリアモデル) @ $V_a=300$  kV

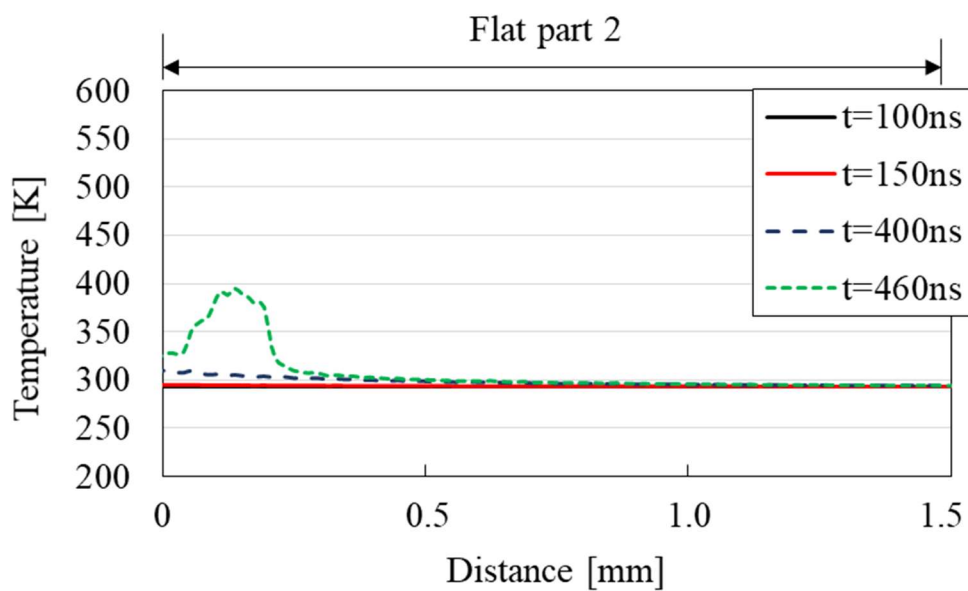


図3-18 第2 油隙部の評価部における温度分布  
(沿面放電抑制バリアモデル) @ $V_a=300$  kV

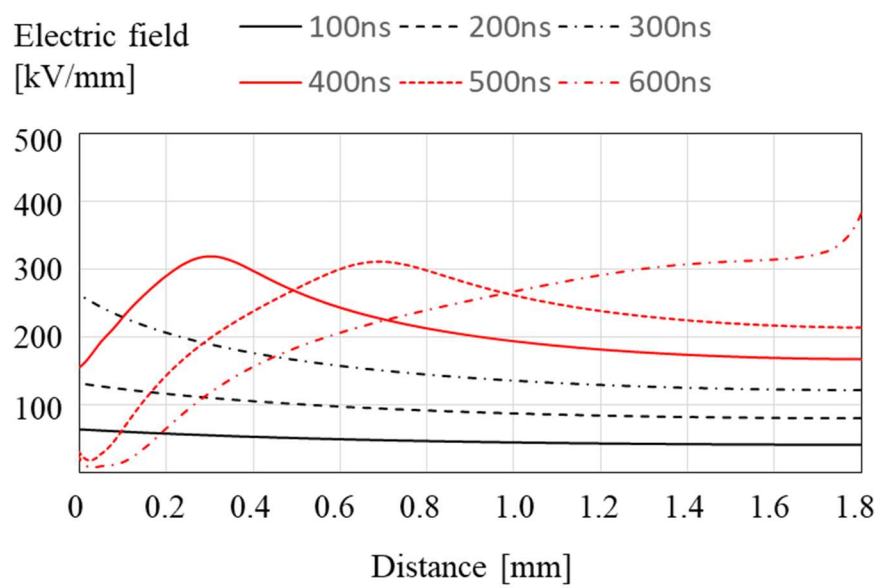


図3-19 第2 油隙部の評価部における電界強度（直列バリアモデル）

### 3. 4 まとめ

第3章では、『複数のバリアPBを用いた油/プレスボード複合絶縁系における沿面放電シミュレーション』について述べた。

本研究着手時には、複数のバリアPBを用いた油/PB複合絶縁系におけるインパルス沿面放電メカニズムの解明が課題であった。そこで、沿面放電メカニズムの解明を目的に、PBで形成された2つの油隙を有するモデル電極を用いた実験系に対して、有限要素法を用いた数値解析シミュレーションを行った。以下に得られた結果をまとめる。

- ① インパルス沿面放電の計算モデルには一般的なポアソン式、電荷連続式、熱拡散方程式に加えて、複合絶縁系特有の電子放出および空間電荷形成などの各種パラメータをナノ秒オーダーの時間・空間分布として計算に考慮することで、実験とシミュレーションで放電進展速度が一致することを確認した。
- ② 高圧電極から進展した放電によって第2油隙におけるバリアPBのくさびギャップ部の電界が強調され、それによって第2油隙でも放電が発生していることを確認した。
- ③ 実験では210 kVで第2油隙にて放電が発生し始めたのに対し、シミュレーションでは300 kVで第2油隙にて放電が発生し始め、実験とシミュレーションで差が生じた。この差異が生じた理由は、放電によりPB中に発生したガスが微小な気泡として残留する点を考慮しなかったためと推定した。

以上の結果より、油隙中の沿面放電メカニズムの解明に大きく近づくことができたと考える。今後は、電極表面の突起による電子放出や、放電によりPB中に発生したガスが微小な気泡として残留する点を考慮してシミュレーションの精度向上と、油/PB複合絶縁システムの放電特性解明を行う予定である。

#### 第3章の参考文献

- [1] 吉田成是, 「油プレスボード複合絶縁システムにおける雷インパルス電圧印加時の放電特性」平成24年電気学会静止器研究, SA-12-121, pp.7-12, 2012
- [2] Ho-Young Lee and Se-Hee, “Numerical analysis for surface discharge on solid insulation in the dielectric liquid and experimental validation”, Korea-Japan Joint

Symposium in Mokpo, 2015

- [3] Ho-Young Lee and Se-Hee, “Fully Coupled Finite-Element Analysis for Surface Discharge on Solid Insulation in Dielectric Liquid with Experimental Validation”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.52, No.3, 2016
- [4] M.Zahn, J.Hwang, F.Sullivan, H.Jortstam, L.Pettersson, R.Liu, P.Biller “A Model for the Initiation and Propagation of Positive Streamers in Transformer Oil” International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp. 210 – 214, 2008
- [5] 吉田成是, 「油プレスボード複合絶縁系における絶縁バリアを介した雷インパルス油中沿面放電特性」平成 27 年電気学会全国大会, 2015
- [6] U. Gafvert; A. Jaksts; C. Tornkvist; L. Walfridsson “Electrical field distribution in transformer oil, ” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 27 , No. 3, pp. 647 – 660, 1992
- [7] Werner F. Schmidt “Electronic Conduction Processes in Dielectric Liquids, ” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. EI-19 , No. 5, pp. 389 – 418, 1984
- [8] A. Denat, B. Gosse, J.P. Gosse “Electrical conduction of solutions of an ionic surfactant in hydrocarbons, ” Journal of Electrostatics., vol. 12, pp. 197 – 205, 1982
- [9] J Qian<sup>1</sup>, R P Joshi<sup>1</sup>, E Schamiloglu<sup>2</sup>, J Gaudet<sup>2</sup>, J R Woodworth<sup>3</sup> and J Lehr<sup>3</sup> “Analysis of polarity effects in the electrical breakdown of liquids, ” Journal of Physics., vol. 39, pp. 359 – 369, 2006
- [10] 電気学会放電ハンドブック出版委員会編, 「放電ハンドブック」, オーム社, p.1901, 1998
- [11] X. Yi, and Z. D. Wang, “Surface Tracking on Pressboard in Natural and Synthetic Transformer Liquids under AC Stress, ” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 20, No. 5, 2013.
- [12] F. Murdiya, R. Hanaoka, H. Akiyama, and K. Miyagi, “Creeping Discharge Developing on Vegetable-based Oil/Pressboard Interface under AC Voltage” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21 , No. 5, pp. 2102 – 2110, 2014

## 第4章 エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明

### 4. 1 まえがき

油絶縁系において、油中に先端の鋭い金属や粒子が存在すると、電界集中を生じて部分放電発生電圧（Partial Discharge Inception Voltage, 以下 PDIV）が低下することが知られている。そのため、鉱油については、針－平板電極や油中に粒子が存在する場合の条件で実験が行われ、その放電特性に関する定量評価および放電観測が行われてきた<sup>[1-8]</sup>。

また、油中に先端の鋭い金属や粒子が存在した場合の電界増倍率  $K(=E_{\max}/E_{\text{ave}}$ ,  $E_{\max}$ :最大局所電界,  $E_{\text{ave}}$ :平等電界強度)についても検討が行われており、以下のようになることが知られている<sup>[9,10]</sup>。特に、針のような金属性の異物の場合、式(4-1)を用いて計算される。ここで、 $\alpha$ および $\beta$ ,  $\gamma$ は式(4-2)で表される。球異物（図4-1(a)）

$$K = 3$$

同軸楕円体異物（図4-2 (b)）

$$K = 1 - \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{1}{2} \ln \beta - \frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \right\} \quad (4-1)$$

$$\text{ただし、} \alpha = \frac{\ln \beta}{2} - \frac{1}{\gamma} \quad \beta = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R}{a}}} \quad (4-2)$$

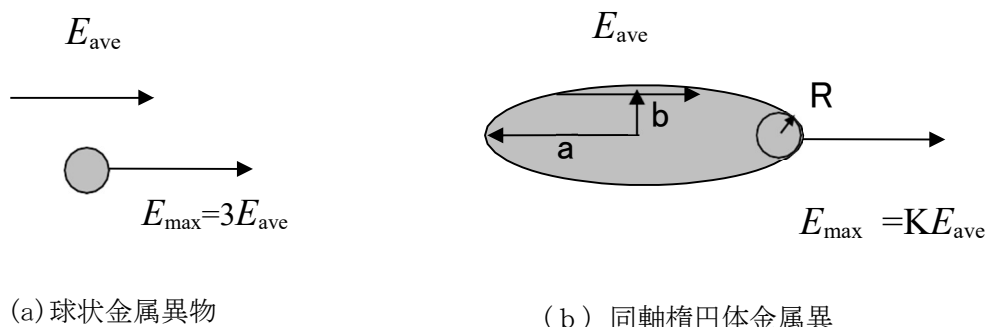


図4-1 金属性異物の表面電界増倍のモデル化

そこで、和田らは、 $1\ \mu\text{m}$  から  $300\ \mu\text{m}$  の範囲での先端曲率半径をもつ針—平板電極系で PDIV 特性の測定結果について報告し、PDIV への金属先端形状の影響を調査している。その結果、変圧器油の針—平板系の PDIV が、先端曲率が約  $10\ \mu\text{m}$  以下では先端曲率に依存せずほぼ一定となることを報告している。また、この特性の要因として、針先端での空間電荷形成による緩和効果を仮定すると、空間電荷の広がりが約  $30\ \mu\text{m}$  になっていることを推定している。また、部分放電開始は、油隙長に依存せず、突起先端の局所電界値で決まることを示している。さらに、部分放電開始時の局所電界が約  $250\ \text{kV/mm}$  で一定になることを実験的に確認している<sup>[11]</sup>。

このように、絶縁油中に金属性の異物が存在すると、放電が発生し、ひいては変圧器の不具合原因となる。そのため、変圧器を製造する際には、金属性の異物が混入しないように設計・製造が行われている。

一方、エステル油についての報告は少ないのが現状である。そこで本論文では、エステル油中に金属針が存在した場合の放電発生電圧を取得し、その長さが与える影響について検討したため報告する。

#### 4. 2 実験方法

図4-2に電極系を示す。高圧・低圧電極に直径  $60\ \text{mm}$  角  $R\ 5\text{mm}$  の平板電極を使用した。その間に、厚さ  $2.4\ \text{mm}$  のプレスボード（以下、PB）を油隙長が  $7\text{mm}$  もしくは  $9\ \text{mm}$  となるように2枚配置し、片側のPB上に金属針として先端曲率半径  $1\ \mu\text{m}$  のトリー針（オグラ宝石工業）を直立させて配置した。金属針の長さを  $L=4, 6, 8\ \text{mm}$  と変更した。

図4-3に試験系および電圧印加条件を示す。印加開始電圧を  $10\ \text{kV}_{\text{rms}}$  とし、10秒間隔ずつの  $5\ \text{kV}$  ステップ昇圧法によって AC 電圧を印加した。Image Intensifier（浜松ホトニクス製、C9546-02）を装着したデジタルカメラ（Nicon D90）を用いた放電発光の有無により部分放電発生を判断した。Cargill 製のエステル油（FR3）と比較のためかんでんエンジニアリング製の鉱油（サンオー ムオイル M1）を使用した。電極系を油で満たし、PDIV をそれぞれ 10 回取得した。

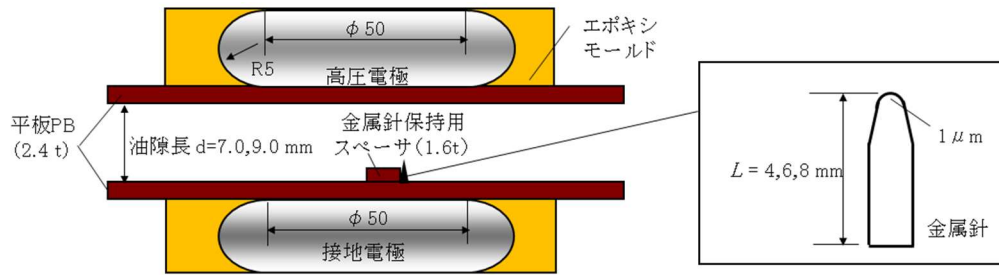


図4-2 電極系

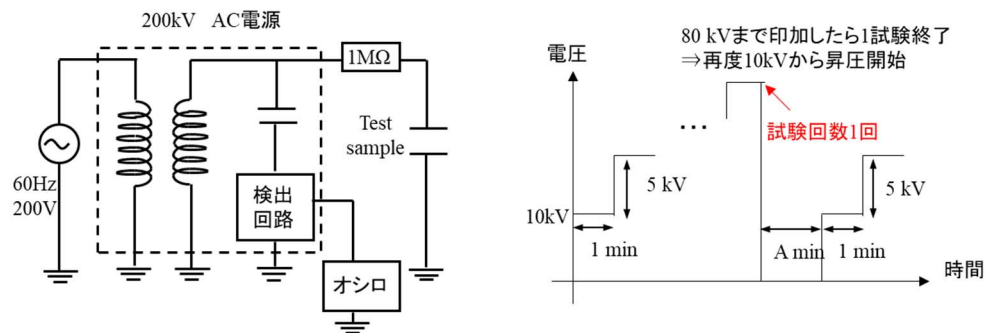


図4-3 試験系および電圧印加条件



## 4. 3 実験結果

### 4. 3. 1 放電発光像

Image Intensifier を装着したデジタルカメラを用いて観測した放電発光像を図 4-4～図 4-11 に示す。図 4-4～図 4-7 はエステル油中で観測した放電発光像であり，図 4-8～図 4-11 は鉱油中で観測した放電発光像である。エステル油と鉱油ともに，いずれの金属針長においても，金属針先端から放電が発生する様子が確認できた。

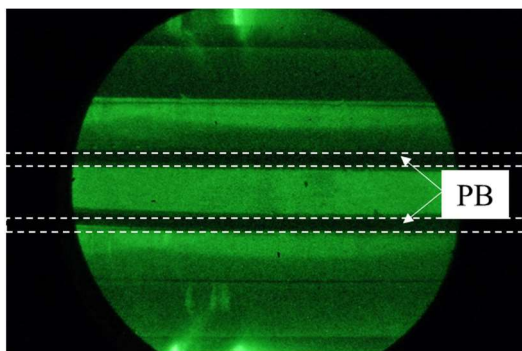


図4-4 エステル油 d=9mm 金属針なし

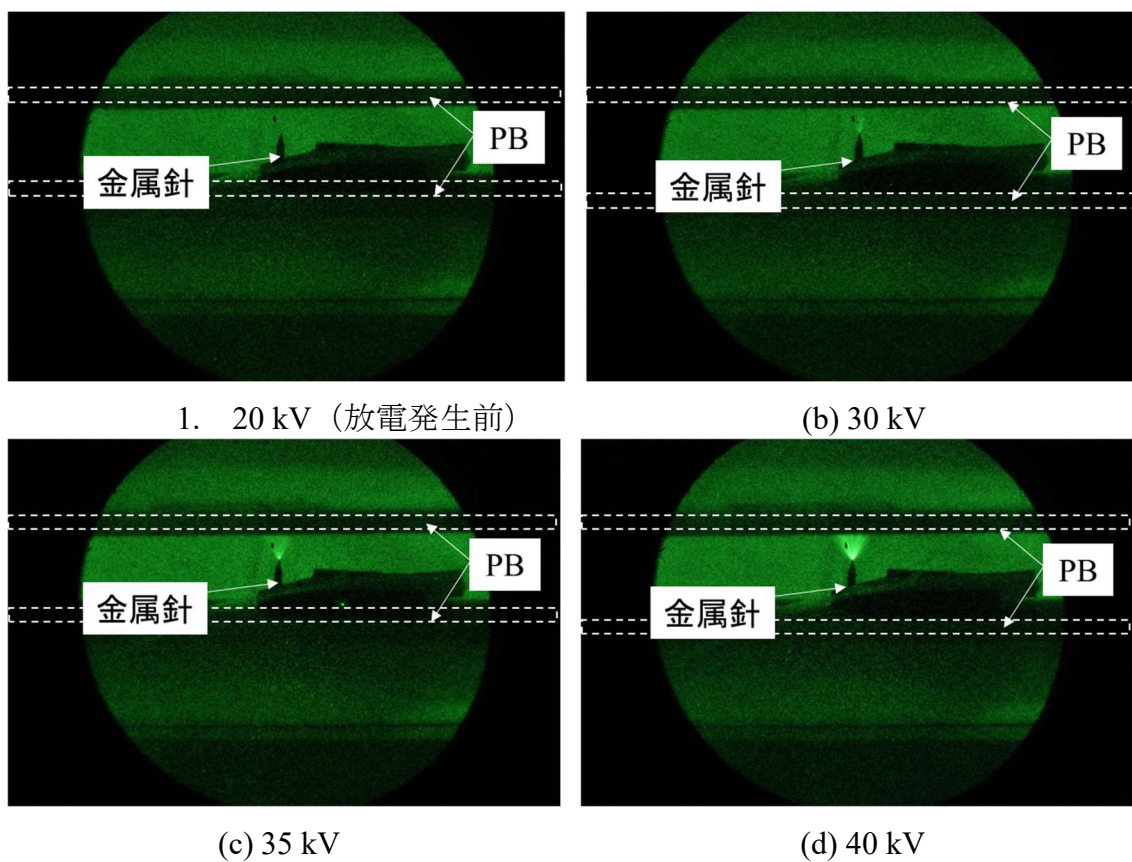
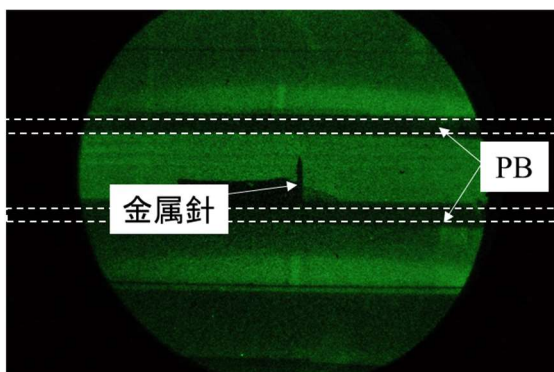
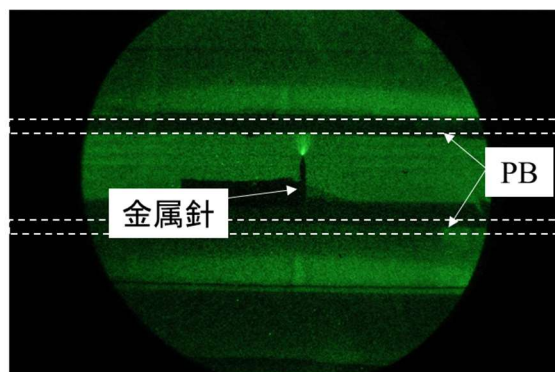


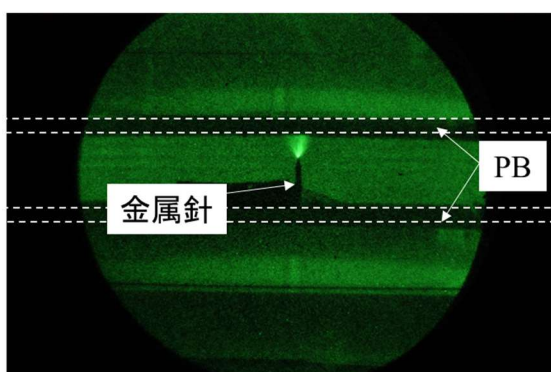
図4-5 エステル油 d=9mm，金属針長 L=4mm



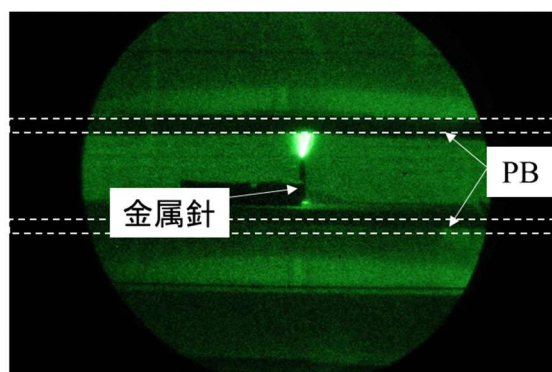
(a) 20 kV (放電発生前)



(b) 35 kV

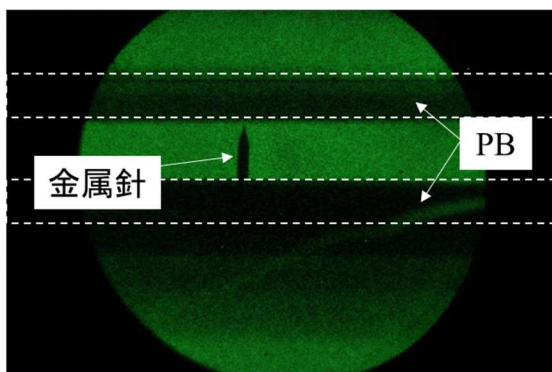


(c) 40 kV

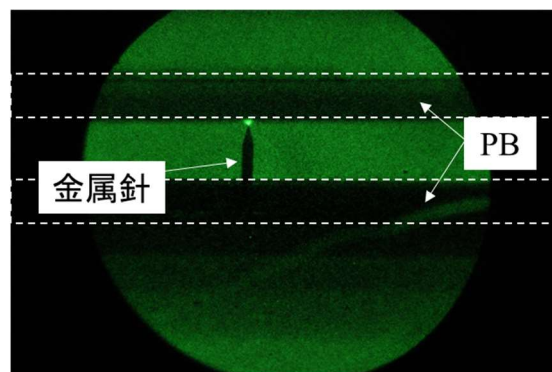


(d) 45 kV

図4-6 エステル油  $d=9\text{mm}$ , 金属針長  $L=6\text{mm}$



(a) 20 kV (放電発生前)



(b) 40 kV

図4-7 エステル油  $d=9\text{mm}$ , 金属針長  $L=8\text{mm}$

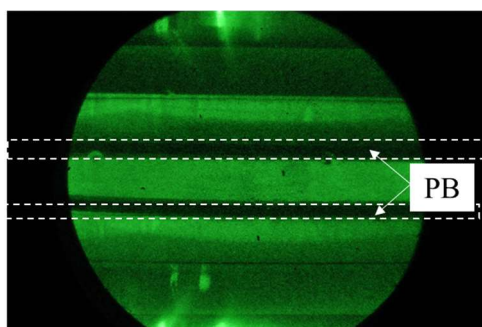
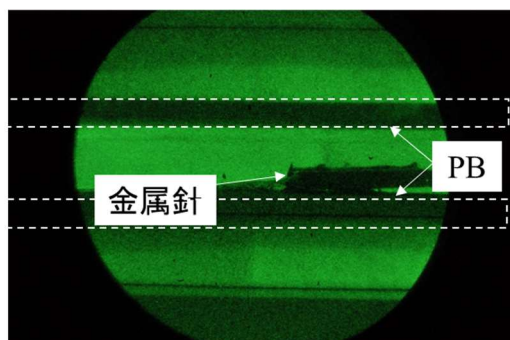
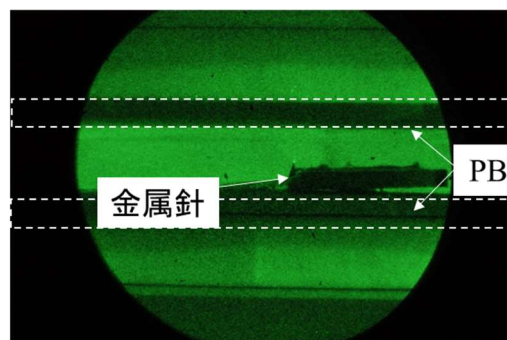


図4-8 鉱油  $d=9\text{mm}$ , 金属針なし

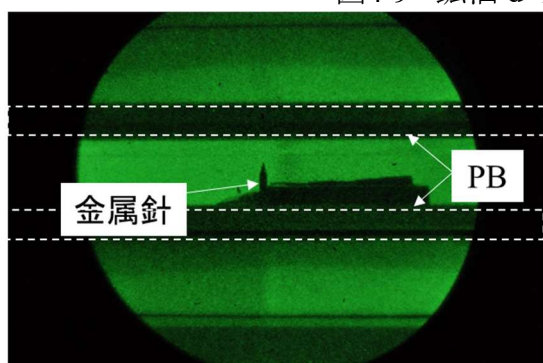


(a) 20 kV (放電発生前)

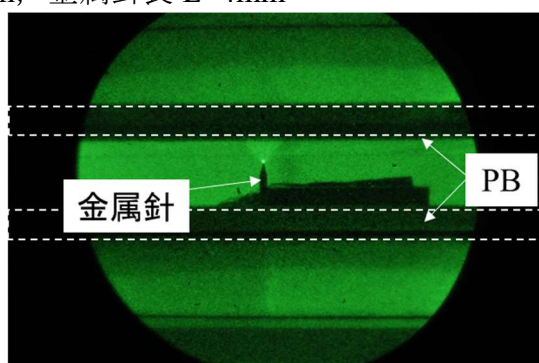


(b) 30 kV

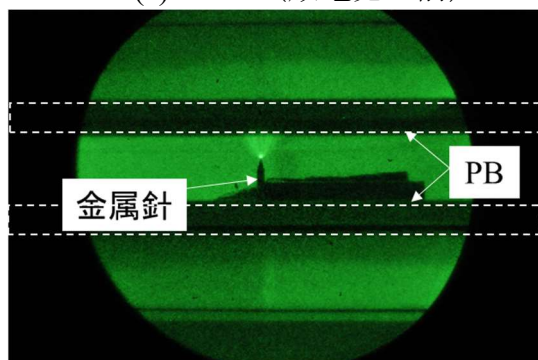
図4-9 鉱油  $d=9\text{mm}$ , 金属針長  $L=4\text{mm}$



(a) 20 kV (放電発生前)



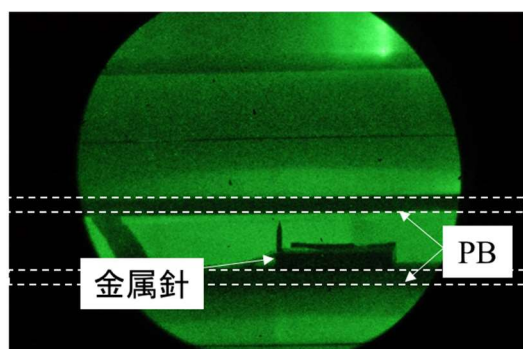
(b) 35 kV



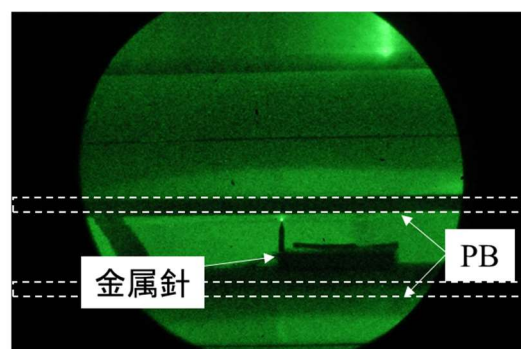
(c) 40 kV

図4-10 鉱油  $d=9\text{mm}$ , 金属針長  $L=6\text{mm}$

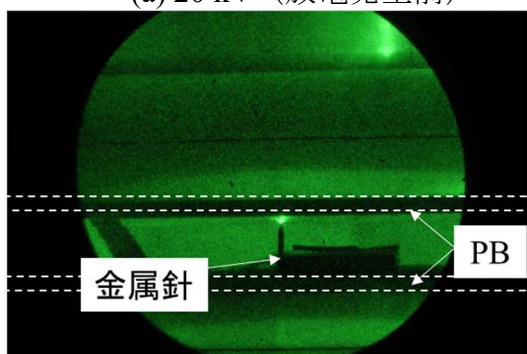




(a) 20 kV (放電発生前)



(b) 40 kV



(c) 40 kV

図4-11 鉱油  $d=9\text{mm}$ , 金属針長  $L=8\text{mm}$

#### 4. 3. 2 印加電圧と放電電荷量

図4-12～図4-19 に印加電圧と測定された放電電荷量の関係を示す。図4-12および図4-16は、エステル油と鉱油中に金属針を配置していない場合の電圧と放電電荷量の関係である。60 kV まで印加しても測定された放電電荷量は 1000 pC 以下であった。一方、図4-13～図4-15, 図4-17～図4-19は、放電発生時の放電電荷量を示している。放電発生に伴い、放電電荷量が急激に増える様子がわかる。今回、2000 pC 以上の放電電荷量が観測された電圧を部分放電開始電圧 (Partial Discharge Inception Voltage : 以下, PDIV) とみなした。

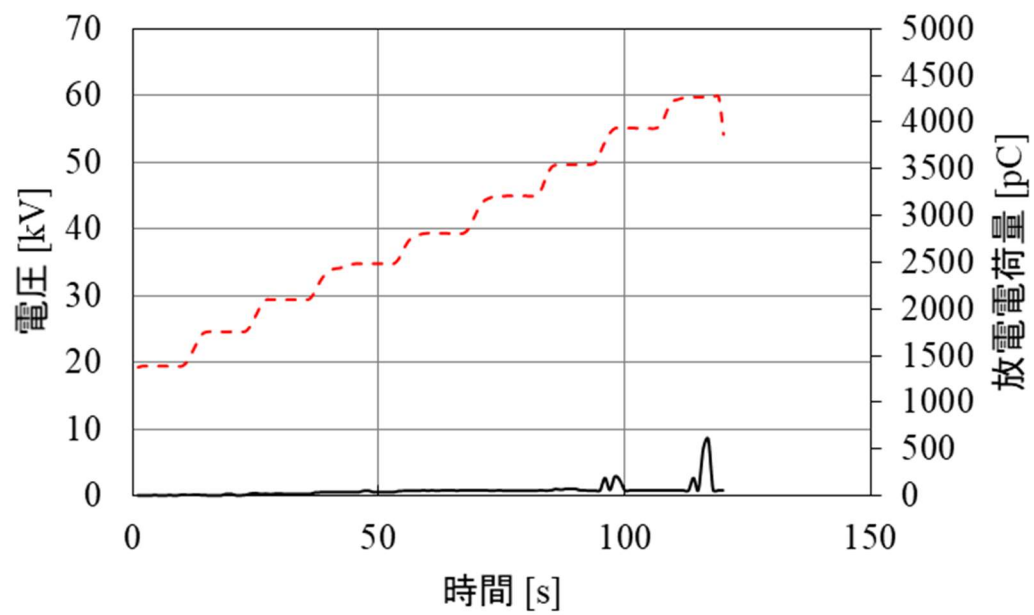


図4-12 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長なし (エステル油)

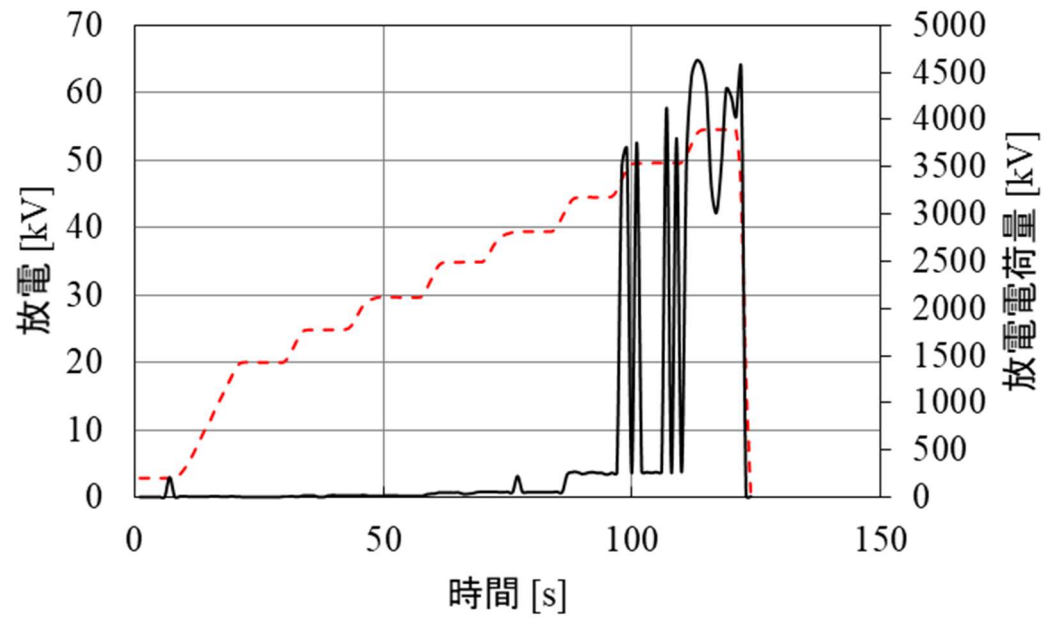


図4-13 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長さ  $L=4\text{mm}$  (エステル油)

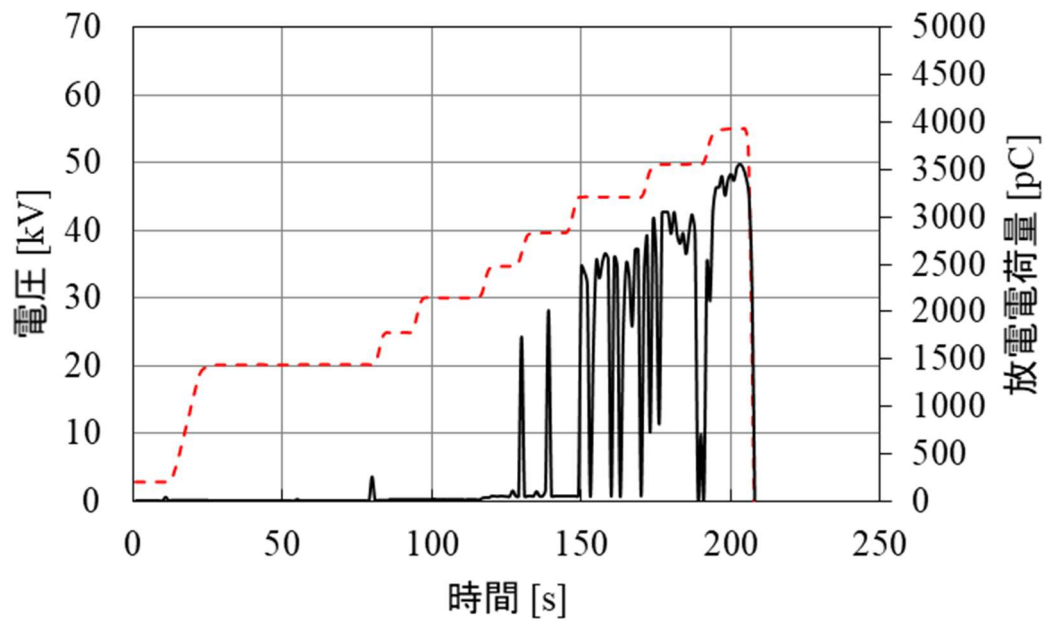


図4-14 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長さ  $L=6\text{mm}$  (エステル油)

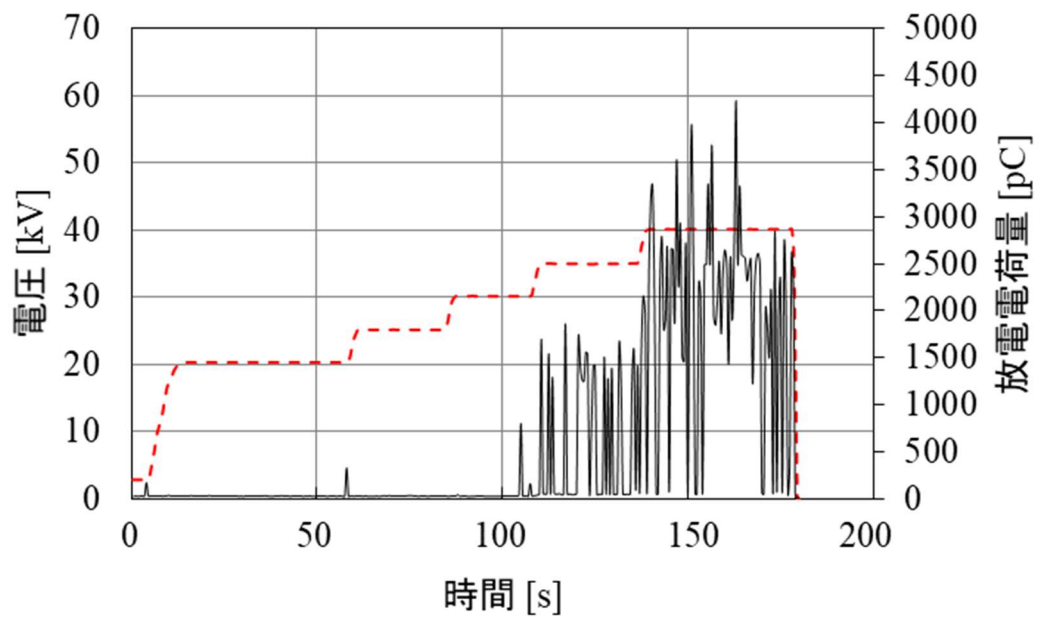


図4-15 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長さ  $L=8\text{mm}$  (エステル油)

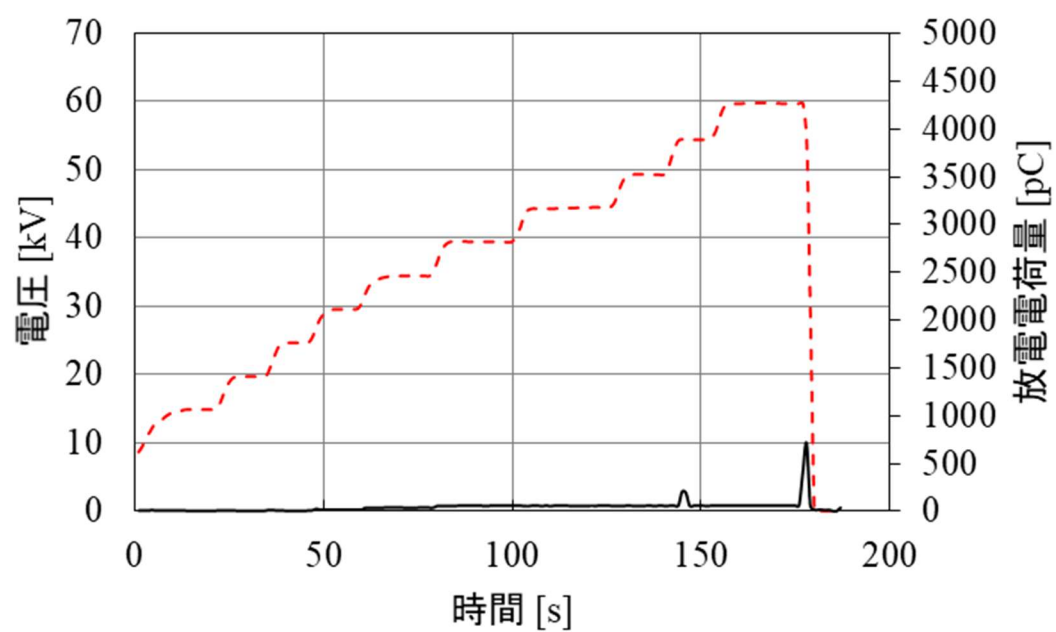


図4-16 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長なし（鉱油）

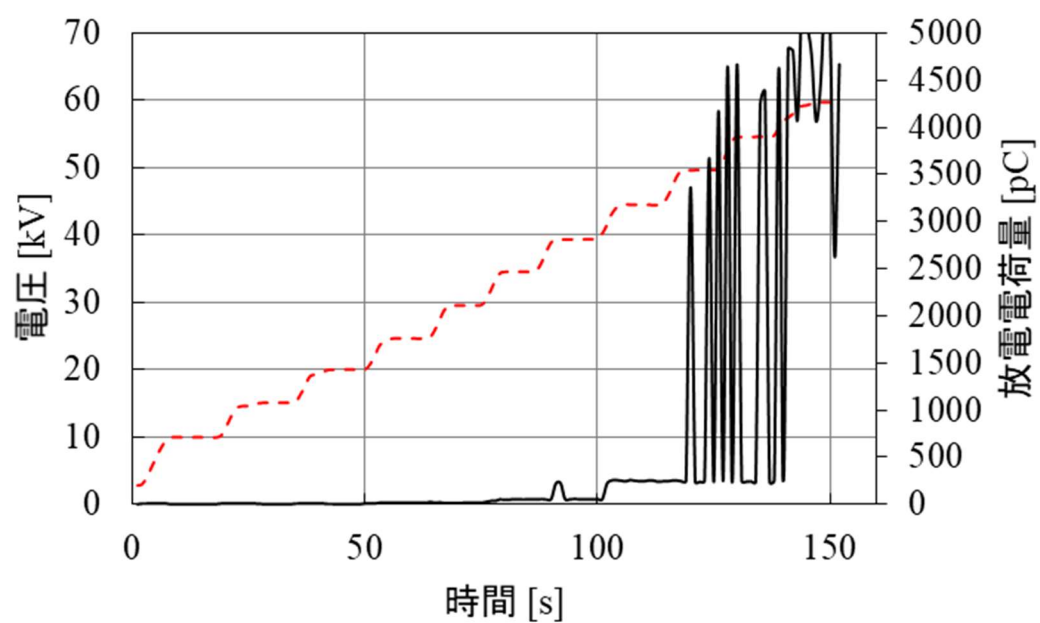


図4-17 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長さ  $L=4\text{mm}$ （鉱油）

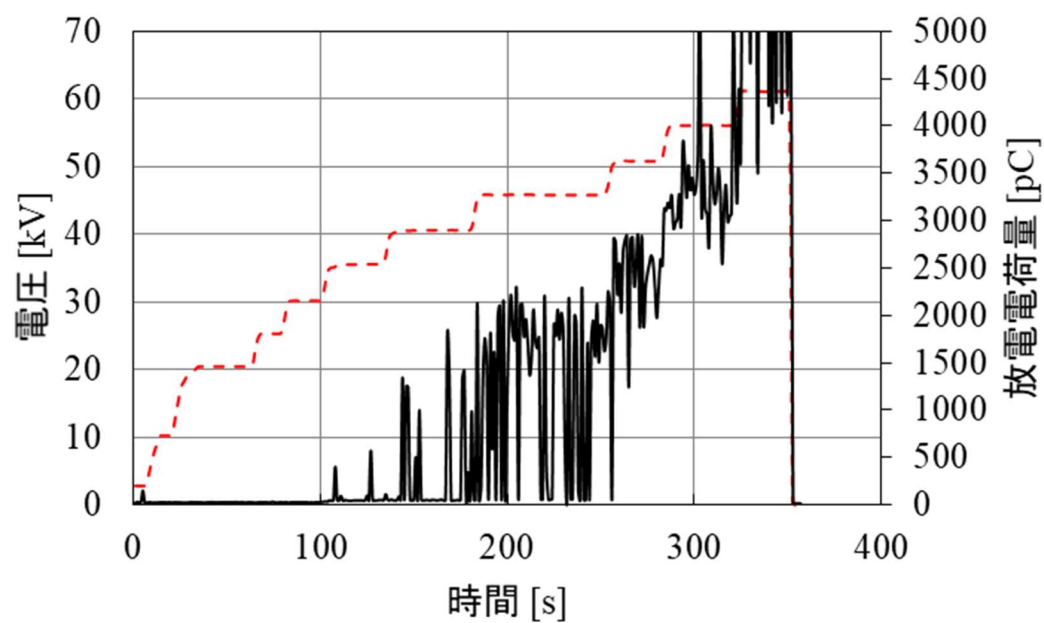


図4-18 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長さ  $L=6\text{mm}$  (鉱油)

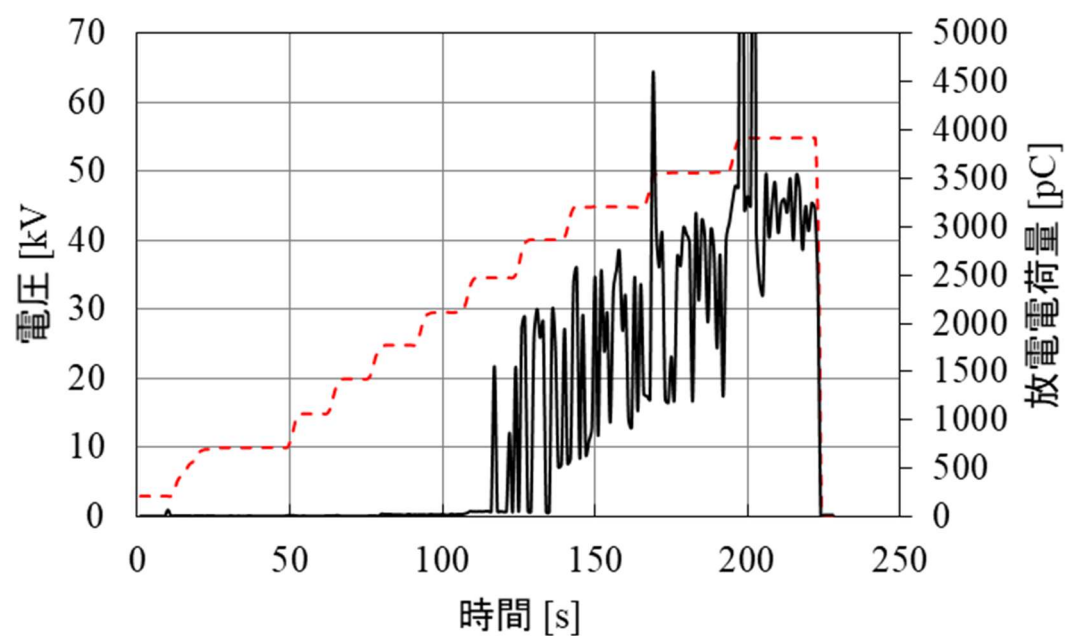


図4-19 油隙長  $d=9\text{mm}$ , 金属針長さ  $L=8\text{mm}$  (鉱油)



#### 4. 3. 3 放電発生電圧および放電発生電界

図4-20 にPDIV の金属針長さ (L) 依存性を示す。鉱油とエステル油ともに、金属針が長くなるにつれ、PDIV が低下することがわかる。また、図4-21にPDIV 時の金属針先端の最大電界  $E_{\max}$  を求めるために用いた電界解析モデルと電界分布を示す。2次元軸対象のモデルを使用し、高压電極は放電発生時の電位 (=PDIV)，金属針は浮遊電位，低压電極は接地電位とした。既報[11]と同様に、空間電荷による針先端電界の緩和を考慮し、見かけ上金属針の先端曲率が  $10\ \mu\text{m}$  になったと仮定して、PDIV 時の  $E_{\max}$  を算出した。ここで、図4-21では油中で、高压電極の印加電圧  $V_a$  を  $20\ \text{kV}$  とした際の電界分布を示している。

図4-22に、PDIV 時の金属針先端における最大電界  $E_{\max}$  を示す。電極間の電位差を PDIV の平均値とし、金属針を浮遊電位として2次元軸対象電界解析により  $E_{\max}$  を求めた。また、既報[1]と同様に、空間電荷による針先端電界の緩和を考慮し、見かけ上金属針の先端曲率半径が  $10\ \mu\text{m}$  になったと仮定して計算した。

図4-22より、 $E_{\max}$  は、約  $400\ \text{kV/mm}$  と極めて高いこと、このような先端が鋭い金属針の場合、金属針長さによらず一定値となることが分かった。

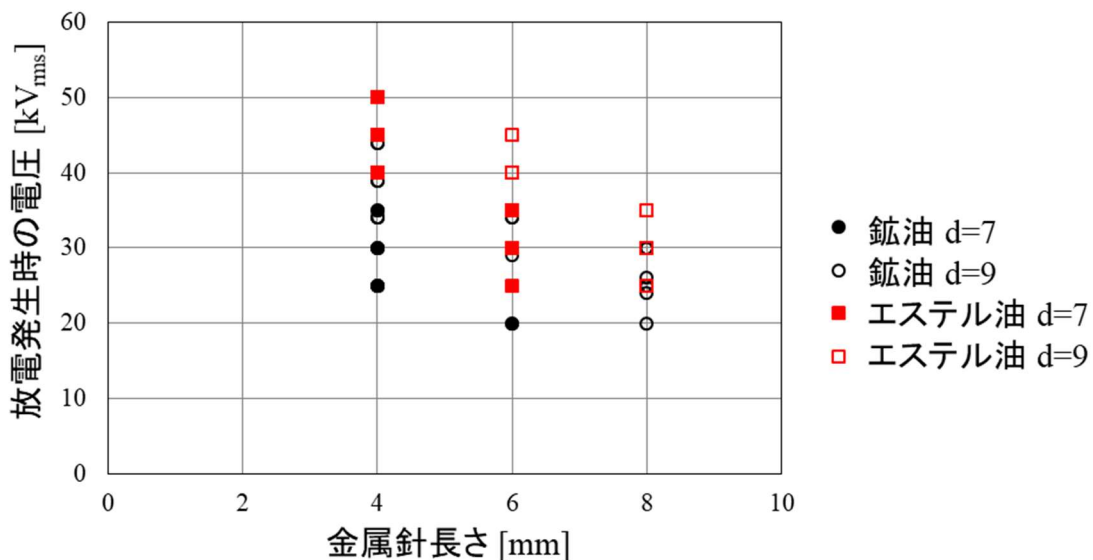


図4-20 PDIV 時の金属針長依存性

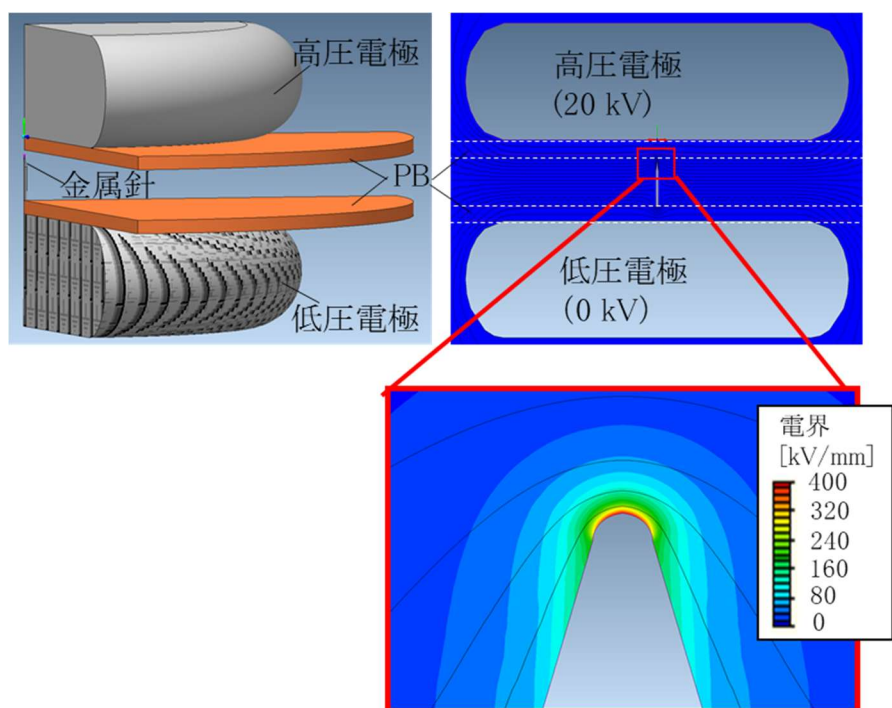


図4-21 電界解析モデルと電界分布@ $V_a=20$  kV

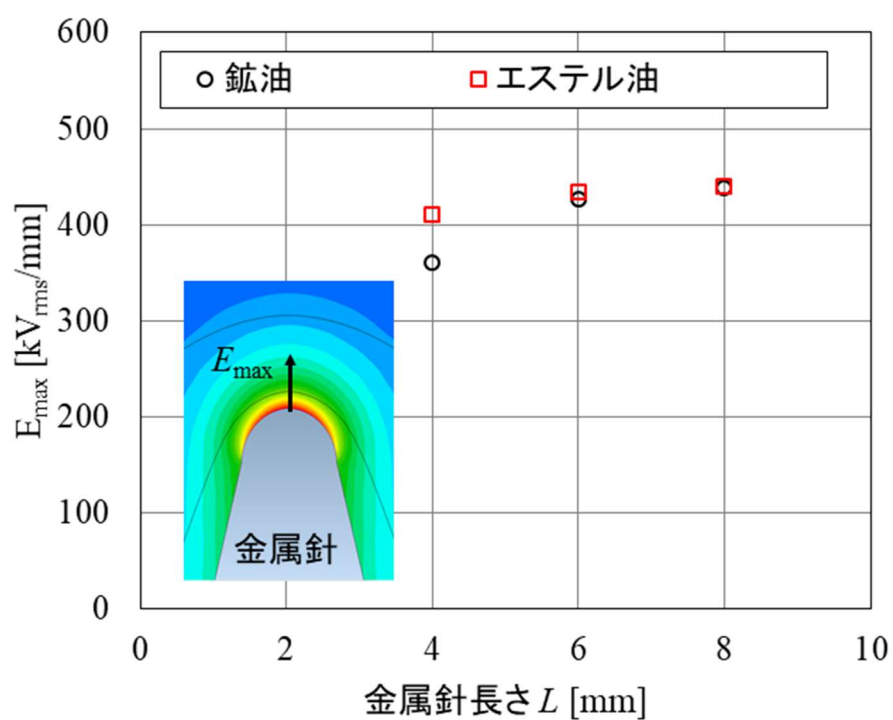


図4-22 金属針先端の最大電界@ $V_a=20$  kV

#### 4. 3. 4 絶縁破壊時の金属針先端最大電界 $E_{\max}$ のワイブルプロット

今回の実験結果（ $L=4, 6, 8\text{mm}$ ）の全ての金属針先端最大電界  $E_{\max}$  をワイブルプロットした結果を示す。図4-23は、エステル油中の絶縁破壊時の金属針先端最大電界  $E_{\max}$  をワイブルプロットした結果である。また、図4-24は、鉱油中の絶縁破壊時の金属針先端最大電界  $E_{\max}$  をワイブルプロットした結果である。また、図4-25は、エステル油および鉱油中の絶縁破壊時の金属針先端最大電界  $E_{\max}$  をワイブルプロットした結果である。ばらつきの指標となる尺度パラメータ  $m$  値は鉱油とエステル油で比較すると、エステル油のほうが大きいこと、すなわち、バラつきが小さいことがわかる。また、放電発生確率が 63.2 %となる電界は、およそ 400～500 kV と高く、これも鉱油とエステル油で大差ないことがわかる。

以上の結果より、鉱油と同様に、エステル油中に金属針が存在した場合も、部分放電発生は金属針先端の最大電界で決まること、ばらつきも小さいことから、鉱油と同様の絶縁設計をエステル油にも適用可能と判断した。

エステル油でも見かけ上金属針の先端曲率が  $10\text{ }\mu\text{m}$  になると仮定した点については、今後の残課題とし、実験的評価を継続する。

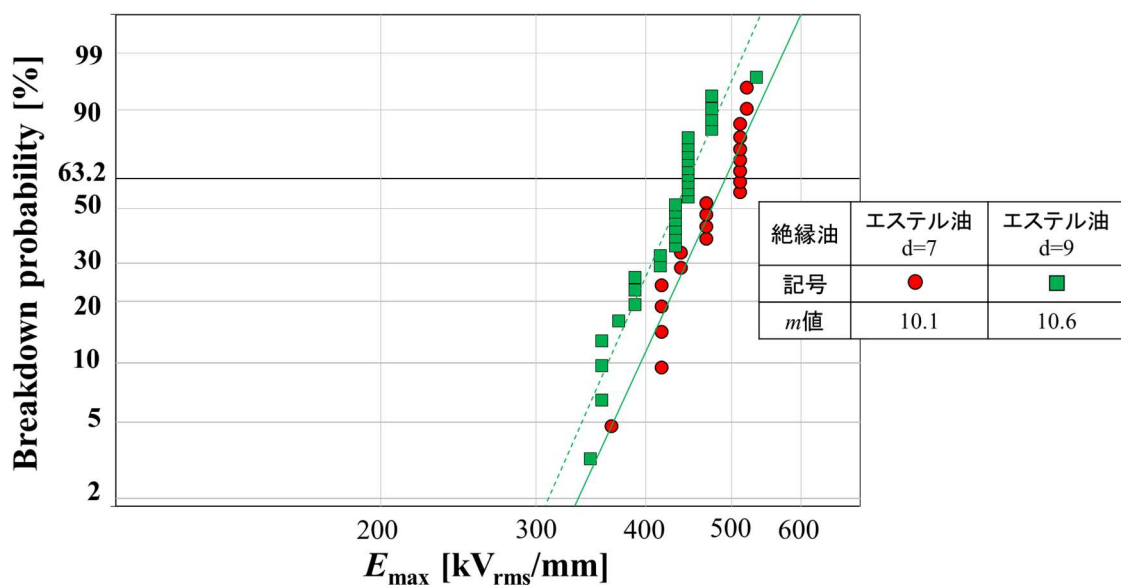


図4-23 エステル油中の放電発生電界のワイブルプロット

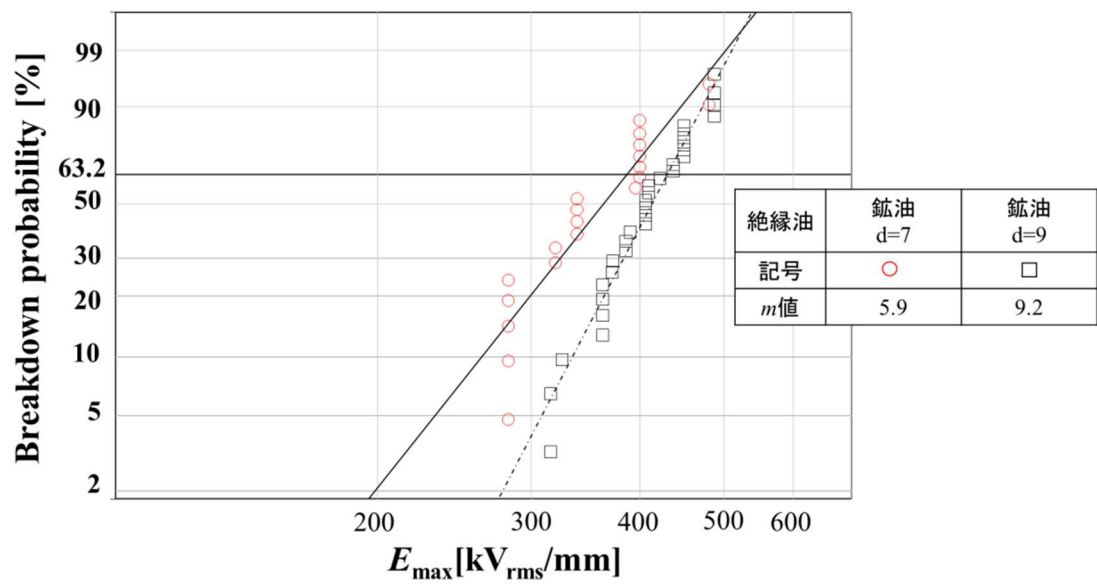


図4-24 鈹油中の絶縁破壊時の金属針先端最大電界 $E_{\max}$ のワイブルプロット

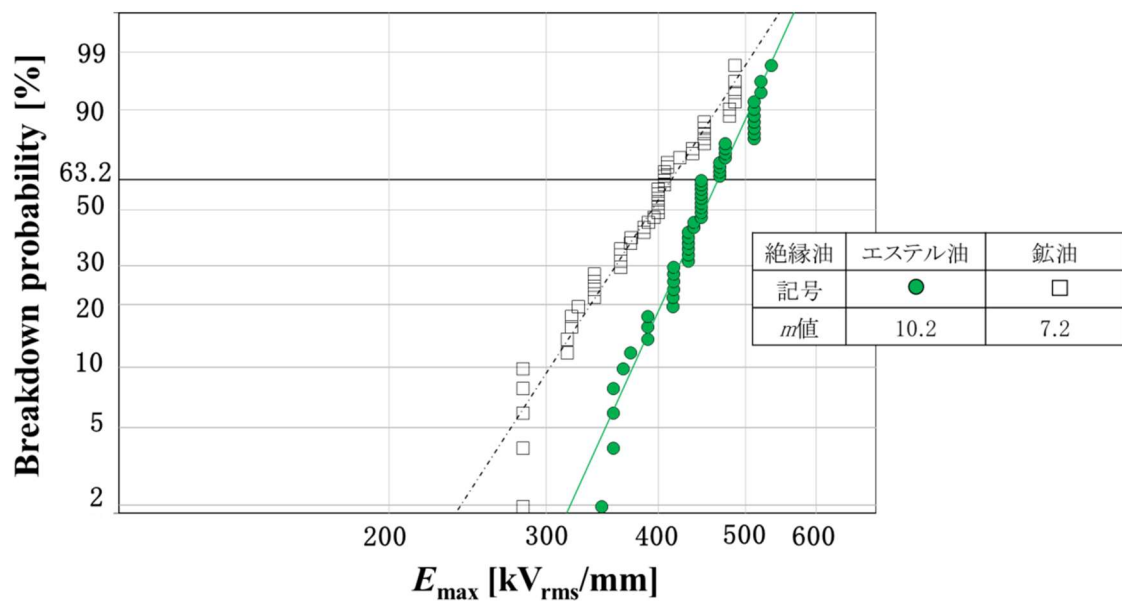


図4-25 エステル油と鈹油の金属針先端最大電界 $E_{\max}$ のワイブルプロットの比較

## 4. 4 まとめ

第4章では、『植物油中における異物性部分放電』について述べた。

本研究着手時には、環境負荷低減の観点から、生分解性油（植物油やエステル油）を封入した変圧器の適用が進んでいるものの、同油中の絶縁異常や長期劣化におけるデータベースが乏しい状況にあった。そこで本章では、油入変圧器の絶縁設計において重要なエステル油中に絶縁異常としての金属異物が存在した場合の部分放電特性を取得し、その長さや絶縁構成配置が与える影響の取得を目的に検討を行った。

今回、電力用油入変圧器の主絶縁部を模擬した電極系において、平行平板電極間の油隙長が9 mmとなるように平板PBを配置し、片側のPB上に金属針が配置された系において、金属針の長さを4,6,8 mmと変化させ、AC電圧印加時の放電発生電圧について評価した。以下に得られた結果をまとめる。

- ① 鉱油と同様に、エステル油中に金属針が存在した場合も、部分放電発生電圧は金属針先端の最大電界で決まることが示された。
- ② 部分放電発生時の金属針先端の最大電界は、約 400 kV/mm と極めて高いこと、このような先端が鋭い金属針の場合、金属針長さによらず一定値となることが分かった。
- ③ 部分放電発生時の金属針先端の最大電界をワイブルプロットし、バラツきの指標であるm値について評価した結果、鉱油と比較してエステル油のm値が大きくなった、すなわち、バラツきの度合いはエステル油のほうが小さいことが判明した。

以上より、エステル油中の金属針が放電に与える影響を十分に解明でき、鉱油と比較してエステル油中でもその絶縁破壊電圧は低下せず、放電発生電界も同等であることから、金属針を考慮した変圧器の絶縁設計は、鉱油と植物油で同様のものを使用して問題ないと考えた。

なお、今回は、見かけ上金属針の先端曲率が 10 $\mu$ m になったと仮定して PDIV 時の金属針先端の最大電界E<sub>max</sub> を求めた。今後は、金属針先端径を変化させた際の放電発生電圧・電界を取得し、この仮定について検証予定である。

#### 第4章の参考文献

- [1] K.N.Mathes, "Influence of Particles on Partial Discharge and Breakdown in Oil", IEEE Int. Symp. On Electrical., Insul.,p751, 1978
- [2] 石川等「絶縁油中における破壊前駆密度変化と前駆電流」, 昭和57年電気学会論文誌A, 102巻11号, p611-618
- [3] 青野等「変圧器油の油中粒子数と破壊特性」, 昭和63年電気学会関西支部連合大会, G3-12
- [4] 栗田等「油浸絶縁構成における部分放電開始電界に及ぼす球状金属粒子の数と粒径の影響」平成7年電気学会論文誌B, p985-991
- [5] 長谷川等「油浸絶縁構成における部分放電開始電界に及ぼす混入異物の影響」, 平成6年, 電気学会関西支部連合大会, G6-16
- [6] 栗田等「油浸絶縁構成における部分放電発生時の金属粒子の挙動」, 平成9年電気学会論文誌A, 117巻7号, p697-703
- [7] 栗田等「油浸絶縁構成における部分放電特性に及ぼす混入粒子の影響」, 平成10年電気学会論文誌A, 118巻6号, p666-675
- [8] .高橋等「不平等電界下における変圧器油の直流破壊電圧に及ぼす円筒側壁の効果」平成11年電気学会論文誌A, 119巻1号, p56-61
- [9] 電気工学ハンドブック
- [10] 電気磁気学 I オーム社
- [11] 和田等「変圧器油の部分放電開始電圧特性に与える金属先端形状の影響」平成 19 年電気学会全国大会, 1-025

## 第5章 総括および今後の展望

本章では、本論文の統括と今後の展望を記述した。

### 5. 1 総括

電力需要の増大や地球温暖化対策の必要性などから、今後は世界的に、エネルギーの無駄をなくした「高効率化」というものが重要になってくる。また、電力エネルギー供給が経済成長（生産性の向上）には必要不可欠であることから、自国で資源を持たない日本は、安定的なエネルギー供給政策についても考える必要がある。この「高効率で安定な電力エネルギー供給」において重要な役割を果たすのが電力機器であり、中でも本論文で取り扱う電力用変圧器は、変電効率に大きく影響する電力インフラの要になっている。

この電力用変圧器に関して、一度変電所で使用が開始されると、内部の確認は容易ではないため、保守・点検作業において手間がかかるという課題があった。そこで、外部からの異常診断や劣化兆候の検出・劣化診断による機器の健全性をリアルタイムで監視可能な変圧器や開閉器を「デジタル変圧器、デジタル開閉器」と呼び、それらを使用した「デジタル変電所」の提案がされている。

一方、最近では、高度経済成長期に大量導入された電力用油入変圧器の運用が30年以上超過していることから、鉱油や絶縁紙の寿命を考慮して更新が推奨されており、更新器については経済性の観点から小形化の要望が高まっている。さらに、持続可能社会の実現に向け、鉱油は廃油時にCO<sub>2</sub>を大量に排出することから、廃油時のCO<sub>2</sub>排出量が少なく、生分解性も高い油として、エステル油の適用が進んでおり、その高信頼化の要望も高まっている。

次世代デジタル変電所開発に向けた変電所内の電力設備の中心的役割を担う電力用油入変圧器の更なる小形化や高効率化のためには、その内部の絶縁特性の改革が重要であり、その一環として絶縁破壊の前駆現象として知られている部分放電メカニズムの解明が重要となっている。また、鉱油の代替となる環境調和型エステル油入変圧器の高信頼化のためには、エステル油中の部分放電特性の解明も重要となっている。以上の背景から本研究では、以下①～③について検討を行った。

絶縁油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明（2章）

放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明（3章）

## エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明（4章）

以下に本論文の構成と概要を記す。

第1章は『序論』である。上記の3点の各種研究に取り組むことになった経緯や研究着手時に山積していた各種課題等について述べた。第2章では、『放電進展後に形成される白色生成物が放電進展速度・部分放電開始電圧に与える影響』について述べた。これは、前述した「①絶縁油/プレスボード複合系における沿面放電特性の解明」のために検討を行った。本研究の着手当時には、油/プレスボード複合系において雷インパルス電圧を繰り返し印加すると、放電発生後に放電経路に沿って白色生成物が残り、絶縁上弱点になる可能性があるという課題あった。そのため、変圧器の絶縁裕度を過剰にとり、変圧器の大型化を招いていた。従って本論では、放電進展後に形成される白色生成物が絶縁上弱点になりえるか把握することを目的に、ストリークカメラ、光電子増倍管、および電流パルス検出を用いて雷インパルス電圧印加下における沿面放電進展速度、部分放電開始電圧を測定した。その結果、白色生成物形成前後において、部分放電開始電圧が13%低減することがわかった。また、白色生成物形成前後で、沿面放電進展速度が103 m/sオーダーから106 m/sオーダーに増加することがわかった。これは、白色生成物形成後の油中の圧力変化に伴う溶解度の変化を観測した結果により、白色生成物の正体が水分由来の気体で形成されていることを別実験から確認できており、このことが前述の実験結果を解釈できると考察した。すはなち、白色生成物は気体であるために、白色生成物形成後の放電進展速度が上昇したと判断した。また、油と比較して気体の放電発生電圧は低いために、部分放電開始電圧も低下したと判断した。これらの結果から、沿面放電発生後に形成される白色生成物が絶縁上弱点になりえるため、実器の出荷時の課電試験において白色生成物の形成に注意が必要であることが判明した。

第3章では、『油/プレスボード複合系における沿面放電進展の数値解析シミュレーション』について述べた。これは、前述した「②放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明」のために検討を行った。本研究の着手当時には、複数のバリアプレスボードを用いた油/プレスボード複合絶縁系における沿面放電メカニズムの解明が課題としてあった。そこで、プレスボードで形成された2つの油隙を有するモデル電極を用いた実験とその沿面放電メカニズムの解明を目的に、有限要素法を用いた数値解析シミュレーションを行った。その結果、インパルス沿面放電の計算モデルには一般的なポアソン式、電荷連続



式，熱拡散方程式に加えて，複合絶縁系特有の電子放出および空間電荷形成などの各種パラメータをナノ秒オーダーの時間・空間分布として計算に考慮することで，実験より得られた104 m/sオーダーの放電進展速度をシミュレーションによって再現することができ，油隙中の沿面放電メカニズムの解明に大きく近づくことができた。

第4章では，『エステル油/プレスボード複合系における異物性部分放電特性』について述べた。これは，前述した「③ エステル油入変圧器の高信頼化に向けた部分放電特性の解明」のために検討を行った。本研究着手時には，環境負荷低減の観点から，生分解性油（植物油やエステル油）を封入した変圧器の適用が進んでいるものの，同油中の絶縁異常や長期劣化におけるデータベースが乏しい状況にあった。そこで本章では，油入変圧器の絶縁設計において重要なエステル油中に絶縁異常としての金属異物が存在した場合の部分放電特性を取得し，その長さや絶縁構成配置が与える影響の取得を目的に検討を行った。今回，電力用油入変圧器の主絶縁部を模擬した電極系において，平行平板電極間の油隙長が9 mmとなるように平板PBを配置し，片側のPB上に金属針が配置された系において，金属針の長さを4,6,8 mmと変化させ，AC電圧印加時の放電発生電圧について評価した。その結果，放電発生電圧は鉱油とエステル油で大差なく，放電発生時の金属針先端電界も，金属針長さによらずおよそ400-500 kV/mmで一定であることが判明した。また，放電発生電界をワイブルプロットすることでバラツきの指標となるm値を比較した結果，鉱油よりも植物油もバラツきが小さくなることが判明した。以上より，エステル油中の金属針が放電に与える影響を十分に解明でき，鉱油と比較してエステル油中でもその絶縁破壊電圧は低下せず，放電発生電界も同等であることから，金属針を考慮した変圧器の絶縁設計は，鉱油ものを流用して問題ないと考える。

最後に本研究によって得られた成果について述べる。①放電基礎特性の解明として，放電進展後に形成される白色生成物が絶縁上弱点になることを明確化した。また，白色生成物が水分由来の油の分解ガスであることを明らかにし，水分管理を行うことによって白色生成物は問題にならないことを明確化できた。②放電シミュレーションを用いた沿面放電進展現象の解明によって，世界で初めてバリアプレスボードを介して連鎖的に進展する放電現象のメカニズムを解明できた。③機器の監視データ蓄積に向けた異物性部分放電特性の解明によって，世界で初めて植物油中の異物性部分放電特性を解明した。

## 5. 2 今後の展望

最後に、将来展望として、今後の少子高齢化や省人化社会に対応するため、次世代の「デジタル変電所」の実現にあたっての課題と解決策について3点述べる。

### 5. 2. 1 安価で小形の機種

電力用変圧器は、高度経済成長期に多く導入され、30年以上経過してもその絶縁性を損なわずに運用がされてきた。一方、絶縁紙の寿命を考慮し、変圧器の設計寿命である30年を越えたものについては更新が推奨されている。図5-1に変圧器の導入量について示す。

2020年以降は、その更新期が増えることが想定されている。また、図5-2に変圧器の価格動向について示す。最近では、海外メーカーの台頭により変圧器価格は従来よりも2割ほど低下している状況にある。以上より、今後、増えていくことが想定される更新器については、従来よりも安価であることが重要である。

また、再生可能エネルギーの導入やスマートシティの提案により、従来の変電所のように山間部に建設される大型の変電所（大容量機器（200MVA以上）が主）よりも、都市部付近に建設される中型の変電所（中小容量機器（60-100MVA））が増えていくことも想定されている。2020年1月7日（火）にアメリカ・ラスベガスで開催された世界最大規模のエレクトロニクス見本市「CES2020」において、トヨタは、静岡県裾野市に「ウーブン・シティ（Woven City）」と呼ばれる実験都市を開発するプロジェクトが発表された。NTTをはじめとする企業や研究者と連携しながら、技術やサービスの開発・実証のサイクルを素早く繰り返し、モノやサービスが情報で繋がることで生まれる新たな価値や、ビジネスモデルの創出が計画されている。この計画が成功した後は、現在のような一極集中型から分散型の都市が増えていくことが予想される。その場合、高経済性成長期に大量導入が進んだ大容量機器（200MVA以上）よりも、中小容量機器（60-100MVA）の導入が増えていくことが想定される。

以上より、今後の変圧器については、海外メーカーとの競争や中小容量機種の増加を見据え、「安価で小形」なものが重要となる。一方、変圧器を小形化した場合、変圧器コイル端部の電界が高くなり、絶縁上弱点となる。そのため、

鉱油/プレスボード複合絶縁系における放電基礎特性を解明することが必要である。第2章では、鉱油/プレスボード複合絶縁系において白色生成物が形成された際の放電基礎特性の解明に向けた検討を行った。今後も、変圧器内における未解明の放電現象に関する検討が継続的に必要である。

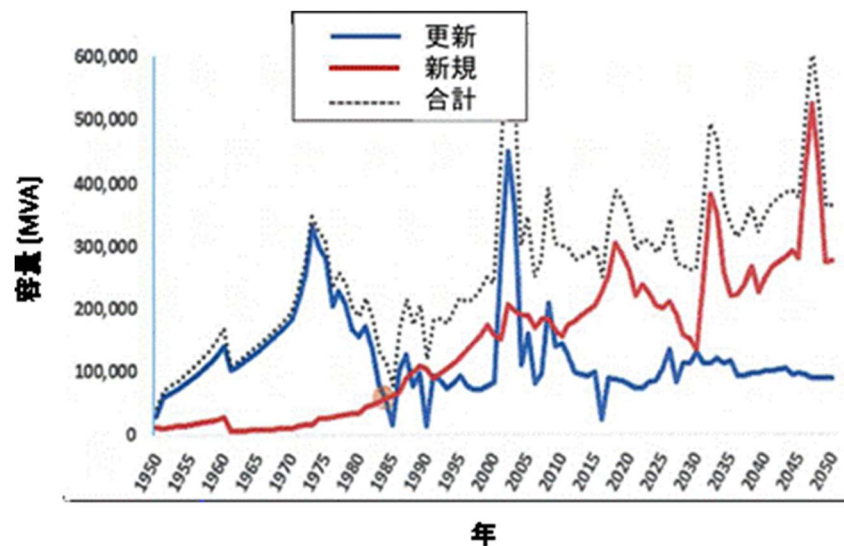


図5-1 変圧器の導入量<sup>[1]</sup>

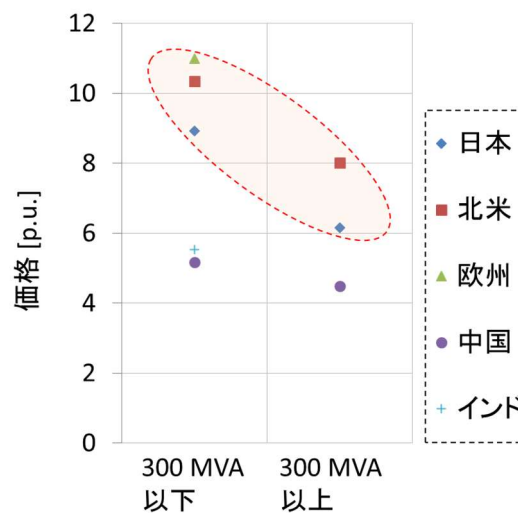


図5-2 変圧器の価格<sup>[1]</sup>

## 5. 2. 2 MBD を活用した機種設計

近年、自動車をはじめとした製品の設計・開発において、「モデルベース開発 = Model Based Design (=MBD)」という考え方が重要な地位を確立しつつある。MBD はいわゆる "V 字モデル" を用いて説明されることが多く、初期の概念設計段階でいかに有効活用できるかが重要となる。図5-3に、シミュレーションを活用した事前検証による手戻りの抑制について説明した図を示す。図5-3は自動車を例に記載している。実機検証など開発後期で仕様レベルのミスが発覚や、不具合等が生じると、再度設計から始める必要があり、大きな手戻りの原因となり、ひいては納期遅れに繋がることもある。これを、開発前期でシミュレーションを行い、机上で妥当性について繰り返し検証することで、開発後期での不具合発覚を前もって抑制するというものである。

MBD は、その定義や利用目的は分野や対象によって様々であり、上記の自動車開発を例にした MBD の考え方をそのまま流用するのは困難であるため、本節では、これまでに培ってきた絶縁試験技術や電界解析技術を基盤として、以下のアプローチを中心に「放電シミュレーション技術の構築」や「自動設計技術の開発」を活用したものを MBD と呼ぶことにする。

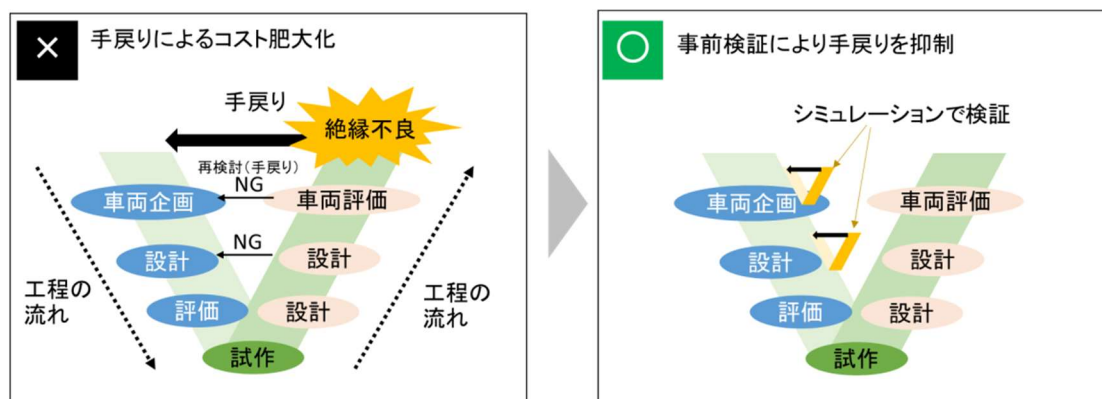


図5-3 シミュレーションを活用した事前検証による手戻りの抑制について

将来の機種設計におけるMBD の構成要素について説明する。図5-4にその構成要素を示す。以下のような構成要素によって MBD は成立する。

### ➤ 要因の見える化

製品に対して求められる仕様に対し、製品の機能や性能を洗い出して構成要素に細分化することで、要求仕様と構成要素の相互依存関係を整理し把握

- 要因・寄与分析  
製品の構成要素に対して性能を見積もることが可能な基本モデル（＝機能モデル）を用意し，実験計画法等のパラメータスタディを実施し，機能に対して影響の大きいパラメータを抽出
- 物理モデル構築（定式化）  
文献調査や実験結果の分析等を通して物理的な見地からの定式化を行うことにより不明部を明確化
- 連成シミュレーション  
連成シミュレーションにより，過渡特性の把握を通して予測精度を向上

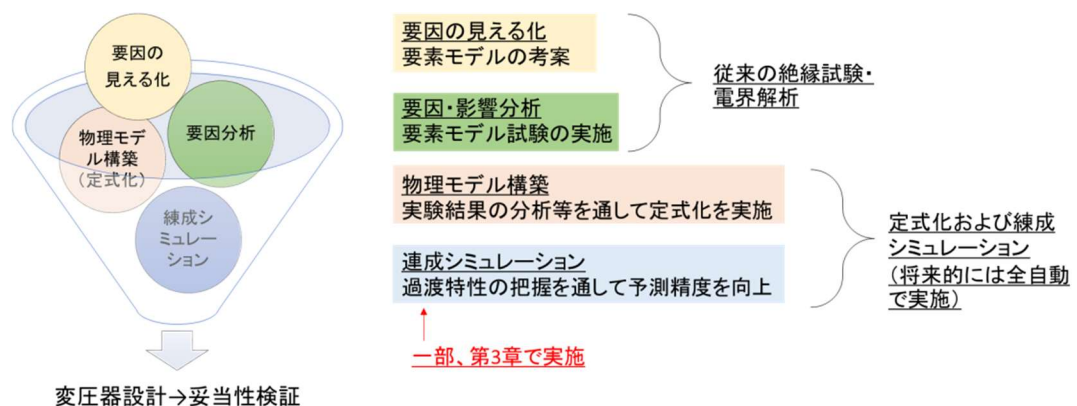


図5-4 MBD 開発の構成要素

従来から行われている変圧器開発においては「要因の見える化」や「要因・影響分析」を行ってきた。すなわち，絶縁試験や電界解析によって，変圧器を要素として分解し，要素モデルを活用して絶縁性能を評価してきた。一方，変圧器については，最終的には検証器を用いて絶縁試験を行い，その性能について評価を行うが，その際，要素モデルと実際の変圧器（検証器）で解離が生じることで，検証試験において絶縁不良が生じることがあった。そこで近年では，前述のとおり，開発前期でシミュレーションを行い，机上で妥当性について繰り返し検証することで，開発後期での検証試験における絶縁不良を前もって抑制することが求められている。これには，以下「物理モデルの構築」および「練成シミュレーション」が重要になると考える。つまり，文献調査や実験結果の分析等を通して物理的な見地からの定式化を行うことによって不明部を明確化することが重要である。また，連成シミュレーションにより，設計初期段階での 3D モデルの簡素化や 1D モデルへの抽象化による電界解析を行うことで，

過渡特性の把握を通じた予測精度の向上を図ることも重要である。これにより、変圧器設計後の検証試験における絶縁不良を抑えることで、今後の開発期間の短縮を図ることが可能となる。例えば電位振動を考慮した電界評価や、放電進展シミュレーションを活用した絶縁性能検証が必要になる。

本研究では、第3章において、沿面放電進展シミュレーションについて検討を行った。今後は、これを活用し、変圧器内部の熱や帯電状態も考慮した放電シミュレーションを行うことで、絶縁性能検証試験の簡素化等を実現予定である。

なお、練成シミュレーションを行う際には、従来の電界解析のように人の手によってパラメータを入力し、解析結果を踏まえたフィードバックを重ねて解析を実施していた（例えば高圧－低圧電極間距離をパラメータにし、出力された電界をフィードバックして、再度電極間距離を変更する。）。しかしながら、パラメータが多くなると、その入力に時間がかかり、結果的に出力結果のフィードバック作業も多くなることから、作業の長時間化を招く。そのため、近年求められている開発期間短縮のためには、そのパラメータ入力や、出力された結果を踏まえた解析のフィードバックに至るまですべての工程を自動で行えることが望ましい。

### 5. 2. 3 絶縁診断用のデータ拡充による信頼性の高い機種提案

変圧器内部で異常（放電、過熱）が発生した場合、変圧器を構成する絶縁紙及び絶縁油などが分解することによってガスが発生し、絶縁油中に溶解する。そのため、従来から用いられている鉱油入変圧器においては、状態監視方法として絶縁油中のガス分析が一般的に用いられており、変圧器の保守・更新の指針として用いられている[2]。表5-1に変圧器の不具合現象と不具合部位の一例を示す。表5-1に記載のLTCとは、負荷時タップ切換装置のことを指す。またLTC絶縁油混入とは、変圧器本体の絶縁油に対して油密構造となっている負荷時タップ切換装置の開閉器室内の絶縁油が、開閉器室のピンホール、亀裂、あるいはシール不良などが原因で、本体の絶縁油と混ざり合うことをいう。また、クリープ現象とは、負荷時タップ切換器あるいは無電圧タップ切換器において、切換頻度が少ないなどの原因により長時間接点と同じ位置にある場合、金属クリープにより接触している部分が微視的にへこむことが原因で接触圧力が低下し、接点の接触面積が減少したり、接点間にスラッジが生成したりして、結果的に接触抵抗が増加して過熱することをいう。

図5-5に、異常時における2種類のガス発生の組成比からなる、ガス診断図の

一例を示す。変圧器の場合、経年劣化など異常以外の要因で発生するガスは異常診断の妨害要因となる。これらの妨害要因の影響低減のため、2種類のガスの組成比からなる異常診断図を構築することで、高精度に異常診断が可能となっている。これにより、ガスパターンのみでは診断が困難であった放電由来、LTC絶縁油混入との切り分けを行うことが可能となる。

一方、最近では、環境負荷低減の観点から、植物油の変圧器への適用が進んでいるが、鉱油と植物油では組成が異なるため、植物油を使用する場合、従来の鉱油の診断指針ではなく、植物油入変圧器に対応した植物油のガス発生特性を把握する必要がある。そこで、例えば三菱電機では、製品納入後の運用を見据え、植物油入変圧器の異常診断技術確立に取り組んでいる[2]。さらに、三菱電機では上記のガス分析をリアルタイムで監視するため、IoT技術を活用した、無線通信方式でのオンライン油中ガス分析装置のシステムも提案している。変圧器内部の絶縁油を常時監視するため、停電、採油の手間がなく、信頼度の高い診断を実現できる。他にも、エステル油中で異常発生時の発生ガスを調査した実験例として、過熱時のガス発生特性については、いくつか報告例がある[3,4,5,6,7]。例えば、加藤らは、エステル油中にヒーターを設置した油中局所加熱装置を用いた実験を行い、発生したガス特性に基づいた過熱温度推定方法を報告している[6,7]。

しかしながら、ガス診断における放電由来の特性を明確化するためには、異物性部分放電・気泡性部分放電といった形で放電についても分類を行い、植物油入変圧器に対応した植物油のガス発生特性を把握する必要があると必要があるが、放電とガスの関係性について、油中での部分放電（PD）[8]やアーク放電[9,10]の報告例はあるがまだ少ない。そこで、今後は、放電とガスの関係性について取得が重要になると考える。

表5-1 変圧器の不具合現象と不具合部位の例

| 現象       | 原因                |
|----------|-------------------|
| 過熱       | LTCの接触不良に伴うクリープ現象 |
|          | 素線間の循環電流          |
| 放電       | LTCの機械的破損         |
|          | 雷IMPの侵入           |
| 過熱＋微小放電  | 電界緩和シールドの不具合      |
| LTC絶縁油混入 | LTCのシール不足         |

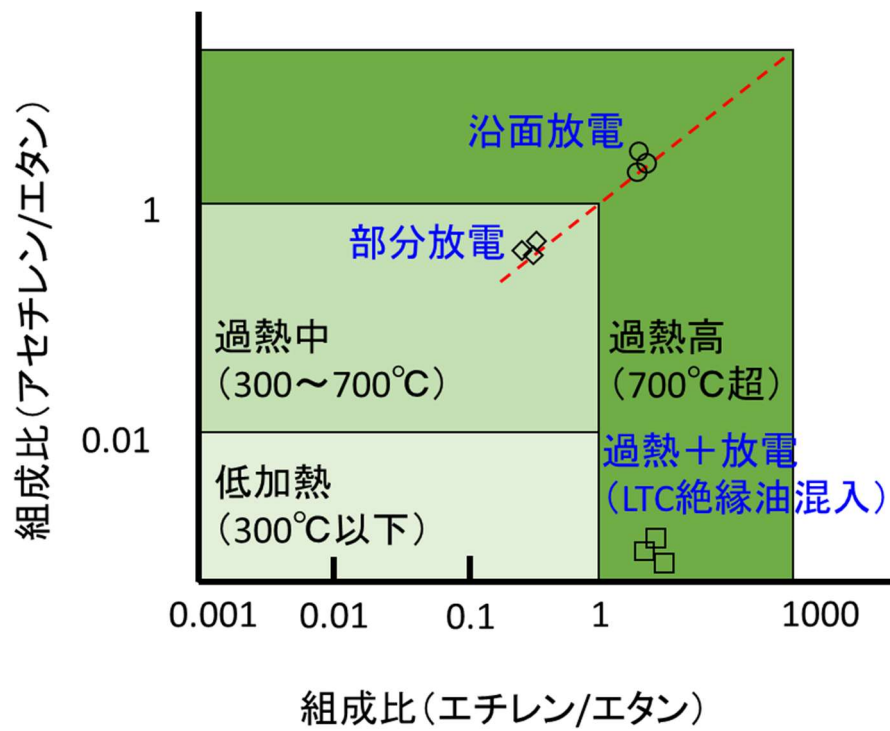


図5-5 ガス診断図の例（鉱油）



## 5. 2. 4 今後の展望のまとめ

将来のデジタル変電所のために必要な技術開発の課題と解決策として、以下①②③について述べた。これらについては、今後の課題として検討予定である。

安価で小形な機種：30年以上使用した変圧器の更新が控えつつも、海外メーカーの台頭や電源分散化に対応するために、安価で小形な機種開発が課題である。そのため、今後も放電基礎特性の解明が重要となる。

放電シミュレーションおよび自動設計技術の確立によるMBDを活用したシステム開発：将来的な省人化や製品出荷時の手戻り削減に対応するために、今後はMBDを活用した開発期間の短縮が課題となる。今回、第3章では、これまでに実験的に推定していた沿面放電メカニズムの妥当性検証を目的に、数値解析を用いたシミュレーションを行ったが、今後は、これを活用し、変圧器内部の熱や帯電状態も考慮した放電シミュレーションを行うことで、絶縁性能検証試験の簡素化等を実現することが重要となる。

絶縁診断用のデータ拡充による信頼性の高い機種の提案：植物油の変圧器への適用が進んでいることから、植物油変圧器に関する絶縁特性の解明が課題となる。特に、変圧器は電力インフラの要であることから、診断用のデータ取得が重要となる。今回、第4章では、植物油/プレスボード複合系における金属異物が部分放電に与える影響について検討を行ったが、今後は、放電とガスの関係性を考慮したガス診断用のデータ取得が必要である。

## 第5章の参考文献

- [1] StatPlan 社「The Global Market For Transformers」
- [2] 電気共同研究会「電気共同研究，電力用変圧器改修ガイドライン」第65巻，第1号
- [3] R.Kuriyama et al. “Investigation of Indicator Gas for Internal Fault on Ester Oil-immersed Transformer” International Conference on Condition Monitoring , DiagNosis and Maintenance2017, #123(2017)
- [4] R.Kuriyama, T.AmimoNo, F.Kato, K.MisuNo, R. Nishimura, and S.Hayamizu  
“Development of International Fault Diagnosis on Non-mineral oil immersed Transformer”, 36<sup>th</sup> Technical Meeting on Oil Session, JPI, pp.53-60 (in Japanese)

- 栗山遼太・網本剛・加藤福太郎・水野康太・西浦竜一・速水賜基：「非鉱油系絶縁油の異常診断技術の開発」，石油学会絶縁油分科会第36回研究発表会，pp.53-60 (2016)
- [5] M.Javalekic , D.Vukovic , and S.Tenbohlen :”Gassing Behavior of various alternative insulating liquids under thermal and electrical stress” , 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.490-493 (2012)
- [6] M.Kato, NOota, and H.Koide : “Study on Decomposition Gases of Various Ester InsulatingOils by Local Heating”, 36<sup>th</sup> Technical Meeting oNoil Session, JPI, pp.28-34 (2016) (inJapanese)
- 加藤雅道・太田延幸・小出英延：「各種エステル系絶縁油の局所過熱時における分解ガス挙動」，石油学会絶縁油分科会第36回研究会，pp.28-34 (2016)
- [7] 牧野裕太・栗原隆史・高橋俊裕・栗本宗明・加藤丈佳「油隙を有する油浸紙積層絶縁系における油分解ガスの発生様相」，電学論 A, Vol.141, No.4, pp.252-259 (2021)
- [8] Y.Yagihashi, H.Kojima, Y.Hatta, and H.Koide : “ Development of DiagNostic Method forOil Palm Fatty Acid Ester based on Dissolved gas Analysis”, The papers of Technical Meetingon Static Apparatus, pp.41-49 (2007) (in Japanese)
- 八木橋義豊・小島明・八田恭典・小出英延：「パームヤシ脂肪酸エステルの異常診断技術の開発」，電気学会静止器研究会要旨集，pp.41-45 (2007)
- [9] Z.Ayalew, K.Kobayashi, S.Matamoto, and M.Kato : “Dissolved Gas Analysis (DGA) of ArcDischarge Faults in Transformer InsulatioNoils (Ester and Mineral oils)”, 2018 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, pp.150-123 (2018)
- [10] 加藤雅道・太田延幸：「エステル系絶縁油中部分放電ならびにアーク放電で生成される分解ガス特性について」，電学論 A, Vol.141, No.3, pp.185-196 (2020)

## 謝辞

本研究を行うにあたり、適切なご指導と多数の有益な助言を与えてくださり、また国際学会などによる勉強の機会を多数与えてくださった小迫雅裕准教授に深く感謝いたします。本論文の副査となって頂き、数多くの有益な助言とご指導を頂いた、九州工業大学の小森望充教授、松本聡教授、豊田和弘教授に心より感謝いたします。

また、本研究を進めるにあたり終始温かいご指導と激励を賜りました九州工業大学の匹田政幸名誉教授に心より感謝いたします。

また、三菱電機株式会社の大穀晃裕氏、佐藤伸治氏、山本和男氏、菅健一氏には、研究への助言のみならず、博士号取得のきっかけを与えて頂き深くお礼を申し上げます。

本研究を共同で進めて頂いた三菱電機株式会社先端技術総合研究所の吉村学上席研究員、梅本貴弘上席研究員、濱田陽紀研究員（当時）をはじめ、本研究の実用化に関連して有益なご助言をいただいた全ての三菱電機株式会社先端技術総合研究所の関係者の皆様へ深く感謝すると共に、会社員として博士後期課程での学位取得を両立させるために、仕事面で様々なサポートをして頂き心より感謝いたします。

同様に、九州工業大学匹田研究室の赤星卓勇氏（当時）、山田大智氏（当時）には、本研究を共同で進めて頂き深くお礼を申し上げます。

最後に、私の身勝手な希望による博士後期課程進学に伴い、時間的・金銭的負担を強いることになってしまったにもかかわらずこれまで私を支えてくれた家族に深く感謝いたします。